



DÉVELOPPEMENT DE LA PUPILLOMÉTRIE POUR LA MESURE OBJECTIVE DES ÉMOTIONS DANS LE CONTEXTE DE LA CONSOMMATION ALIMENTAIRE

Anaïs Lemerrier

► To cite this version:

Anaïs Lemerrier. DÉVELOPPEMENT DE LA PUPILLOMÉTRIE POUR LA MESURE OBJECTIVE DES ÉMOTIONS DANS LE CONTEXTE DE LA CONSOMMATION ALIMENTAIRE. Psychologie. Université Paris 8, 2014. Français. NNT: . tel-01181133

HAL Id: tel-01181133

<https://theses.hal.science/tel-01181133>

Submitted on 29 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE VINCENNES SAINT-DENIS

Discipline : Psychologie cognitive

DÉVELOPPEMENT DE LA PUPILLOMÉTRIE POUR LA MESURE OBJECTIVE DES ÉMOTIONS DANS LE CONTEXTE DE LA CONSOMMATION ALIMENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 19 décembre 2014 par
Anaïs LEMERCIER

Directeur de thèse : Thierry BACCINO
Co-directeur de thèse : Pascal SCHLICH

JURY

M. Charles TIJUS, Université de Paris 8, France.....	Président
M. Sylvain SIROIS, Université du Québec, Canada.....	Rapporteur
M. Julien DELARUE, AgroParisTech, France.....	Rapporteur
M. Philippe COURCOUX, ONIRIS, France.....	Examineur
M. Thierry BACCINO, Université de Paris 8, France.....	Directeur de thèse
M. Pascal SCHLICH, INRA, Dijon, France.....	Directeur de thèse
Mme Geneviève GUILLOT, Pernod Ricard, Créteil, France.....	Membre invitée

« Le succès n'est pas final, l'échec n'est pas fatal : c'est le
courage de continuer qui compte. »
Winston Churchill

AVANT-PROPOS

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) proposée par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT). Cette convention a été établie entre la société PERNOD agissant pour le compte du Centre de Recherche PERNOD RICARD (CRPR) (Créteil ; France), l'université de Paris 8 (Saint-Denis ; France) agissant tant en son nom et pour le compte du Laboratoire CHART-LUTIN (EA 4004) et l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) (Dijon ; France).

La collaboration avec le CRPR s'est réalisée avec le service « Analyse Sensorielle et Science du Consommateur ». Les partenaires industriels impliqués dans le projet sont : Geneviève Guillot, responsable d'études sensorielles et consommateurs et Claire Garrel, chef du service « Analyse Sensorielle et Science du Consommateur ».

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été le fruit de nombreuses et belles rencontres. Sans ces rencontres, ces trois dernières années n'auraient jamais été aussi riches. Je tiens ainsi à remercier un certain nombre de personnes.

Tout d'abord, je souhaite remercier **Thierry Baccino**, mon directeur de thèse, pour avoir accepté de diriger ces travaux et de m'avoir permis de découvrir le passionnant domaine de la psychologie.

Je tiens à remercier chaleureusement **Pascal Schlich**, co-directeur et initiateur de ce projet de thèse. Depuis notre première rencontre en mars 2010 nous avons parcouru un beau bout de chemin ensemble, un stage de fin d'études, un CDD, une thèse et ce n'est que le début, je l'espère. Merci Pascal de m'avoir fait confiance, de m'avoir accompagnée, de m'avoir poussée à toujours donner le meilleur de moi-même.

Merci à **Claire Garrel** pour m'avoir chaleureusement accueillie dans l'équipe analyse sensorielle et science du consommateur du centre de recherche Pernod Ricard. Merci pour ta confiance et tes nombreux conseils.

Je tiens bien évidemment à remercier **Geneviève Guillot**. Tout comme Pascal, nous travaillons ensemble depuis maintenant plus de quatre ans. Merci pour ton aide, ton éternel enthousiasme et ta bienveillance.

Merci à **Philippe Courcoux** pour son aide précieuse tout au long de ce travail de thèse.

Merci aux membres de mon jury de thèse. À **Sylvain Sirois** et **Julien Delarue**, pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Merci à **Charles Tijus** et **Philippe Courcoux** pour avoir accepté de présider et de participer à ce jury de thèse.

Merci à tous les membres ou ex-membres de la plateforme sensorielle, à **Christine L.**, **Aude**, **Caroline L.**, **Betty**, **Catherine**, **Sylvie Co.**, **Sylvie Cr.**, **Christine U.**, **Michel V.** que j'ai eu le plaisir de côtoyer au quotidien lors de ma période dijonnaise. Un clin d'œil tout particulier aux thésard(e)s, CDD et stagiaires avec qui j'ai partagé de nombreux bons moments, merci à **Caroline P.**, **Coralie**, **Nadra**, **Carole**, **Laura**, **Arnaud**, **Guillaume**, **Marine D.**, **Mélanie**, **Mino** et bien sûr à celle qui en tant que colloc' de bureau à partager beaucoup avec moi, à **Marine P.**, merci pour son soutien et son oreille attentive. Enfin, merci également à la joyeuse bande des thésards, ingénieurs et autres actuellement ou précédemment membres du Csga : **Syrina & Julien**, **Amélie & Christophe**, **Aude-Reine**, **Alex & Thomas**, **Camille & David**, **Cédric & Adeline**, **Michel T.**, etc. J'en oublie certainement mais merci pour tous ces moments partagés...

Merci à toutes les personnes du Centre de Recherche Pernod Ricard. Je remercie tout particulièrement **Julia**, **Céline**, **Adrien** et **Elodie**, qui ont toujours répondu présents pour m'écouter. Vraiment, merci beaucoup pour votre soutien mais surtout vos conseils. Merci aux membres ou ex-

membres de l'équipe analyse sensorielle et science du consommateur, à **David, Nico, Domi**, pour tous ces instants partagés. Merci également à **Vincent, Laurence, Amélie, Fifi, Jorge, Anastasia, Clémence, Juliana, Guillaume**, etc. Je ne peux faire une liste complète mais merci à tous ! Enfin, je tiens également à adresser un grand merci à mes deux stagiaires qui m'ont été d'une aide précieuse pour la mise en place de mes deux dernières expérimentations. En premier lieu, merci à **Carole** qui a largement dépassé mes attentes. Egalement, merci à **Clothilde** pour son travail rigoureux. Vous avez été indispensables à la réussite de cette thèse.

Merci, bien sûr, à tous les participants à nos études, sans lesquels nos recherches ne seraient pas possibles.

Merci à **Marco Pedrotti** pour ses conseils, ainsi qu'à tous les membres de l'équipe du LUTIN que j'ai pu croiser.

Et enfin de manière plus personnelle :

Merci à mes ami(e)s.

J'aimerais faire un clin d'œil spécial aux urban girls, **Emilie, Perrine**, et **Elodie**. Merci pour ces heures de « souffrance » partagées mais surtout pour tous les bons moments partagés à côté. Egalement, merci à mes **amis d'école d'ingé**. Une thèse ? T'as vraiment du courage ! Je vous pardonne pour m'avoir de nombreuses fois répondu « Mais tu n'as toujours pas fini ta thèse ? C'est long... ». Avec une mention spéciale à **Laure**. Qui aurait cru qu'on choisirait de faire une thèse toutes les deux. Et enfin merci à mes amis de tout horizon pour avoir, chacun à leur manière, contribué à me porter jusqu'ici. Plus particulièrement, merci à **Eddy & Candice**, ainsi qu'à **Julie & Florent**.

Merci à ma « belle » famille.

À **Jeanine** et **Claude**, à **Marie-Christine** et **Patrick**, à **Cyrille** et à **Liliane**. A tous ces moments partagés et à tous ceux qui suivront.

Et enfin, merci à ma famille.

Merci à mes grands-mères, mes oncles et tantes, mes cousins/cousines...

Surtout, merci à **mes parents** sans qui je ne serai pas là aujourd'hui. Pour leur amour, leur soutien, leur fierté, merci pour tout.

Merci à mon frère, **Arnaud** et ma belle-sœur **Virginie**. Merci pour votre bel esprit de famille, merci pour tous ces moments que l'on partage. Bien sûr, merci à ma nièce **Elsa**... parce qu'être une tatanaïs ça apporte tellement de bonheur ! Et merci à mon neveu **Clément** tout fraîchement arrivé parmi nous pour deux fois plus de bonheur !

Et pour finir, au plus important, à **Max**, pour sa présence et son soutien. A nous, ces moments partagés et tous ceux à venir...

Merci à tous...

VALORISATION DES TRAVAUX DE THESE

Publications

- Lemerrier, A., Szymezak, C., Guillot, G., Courcoux, P., Garrel, C., Baccino, T., Schlich, P. (*en préparation*) – Effects of chemosensory stimuli on pupil diameter. *Food Quality and Preference* (**Chapitre 4**)
- Lemerrier, A., Cortes, C., Szymezak, C., Guillot, G., Courcoux, P., Garrel, C., Baccino, T., Schlich, P. (*en préparation*) – Pupillometry as a tool for a better understanding of the link between emotions and preferences among different contexts. *International Journal of Psychology* (**expérience 3 du chapitre 5 et chapitre 6**)
- Lemerrier, A., Guillot, G., Courcoux, P., Garrel, C., Baccino, P., & Schlich, P. (2014). Pupillometry of taste: Methodological guide – from acquisition to data processing – and toolbox for MATLAB. *The Quantitative Methods for Psychology*, 10 (2), 179-195 (**chapitre 3**)

Communications orales

- Lemerrier, A., Szymezak, C., Guillot, G., Courcoux, P., Garrel, C., Baccino, T., Schlich, P. (2014). - Emotions et dilatation des pupilles... Quand les odeurs s'en mêlent ! In *Journée des Doctorants du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation*, Dijon, 19 juin
- Lemerrier, A., Cortes, C., Guillot, G., Courcoux, P., Garrel, C., Baccino, T., Schlich, P. (2013). - Impact of emotions on hedonic assessment. In *Pernod Ricard Sensory Network*, Paris, November 21
- Lemerrier, A., Cortes, C., Guillot, G., Courcoux, P., Garrel, C., Baccino, T., Schlich, P. (2013). - Pupillometry, a complementary tool to sensory analysis. In *30th Pupil Colloquium*. Point Clear, AL, USA, September 8-12
- Lemerrier, A., Cortes, C., Guillot, G., Courcoux, P., Garrel, C., Baccino, T., Schlich, P. (2013). - Quand les papilles dorment, les pupilles dansent. In *Journée des Doctorants du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation*, Dijon, 25 juin
- Lemerrier, A., Schlich, P., Guillot, G., Garrel, C., Baccino, T. (2012). - De la papille à la pupille ! In *Journée des Doctorants du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation*, Dijon, 19 juin
- Lemerrier, A., Schlich, P., Guillot, G., Garrel, C., Baccino, T. (2012). - Potentiel de la pupillométrie en analyse sensorielle. In *Assemblée Générale de l'Association Sens&Co*, Paris, 02 avril

- Lemerrier, A., Schlich, P., Guillot, G., Garrel, C., Baccino, T. (2012). - Use of pupillometry and eye movements to better understand the consumer food choices and preferences. In *Pernod Ricard Sensory Network*, Paris, 2-3 February
- Lemerrier, A., Martin, C., Schlich, P. (2011). - Could pupil dilation measurements be of any help to sensory analysis? In *29th Pupil Colloquium*, Tübingen, September 25-29

Poster oral

- Lemerrier, A., Schlich, P., Guillot, G., Garrel, C., Baccino, T. (2012). - Pupillometry As a Tool to Better Understand Emotions Driven by Food Perception. In *5th European Conference on Sensory and Consumer Research*, Berne, September 9-12

Poster

- Lemerrier, A., Cortes, C., Szymezak, C., Guillot, G., Courcoux, P., Garrel, C., Baccino, T., Schlich, P. (2014). – Pupillometry as a tool for a better understanding of the link between emotions and preferences among different contexts. In *6th European Conference on Sensory and Consumer Research*, Copenhagen, September 7-10

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
PARTIE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
CHAPITRE 1 : NOTRE PERCEPTION DES ALIMENTS SOUS INFLUENCE	7
1. Multimodalité ou intégration multimodale : influence de nos différents sens sur notre jugement perceptif	8
1.1. Définition.....	8
1.2. Interaction entre la perception du goût et de l'odeur	8
1.3. Interaction entre les systèmes tactile et trigéminal et la perception du goût et de l'odeur	9
1.4. Interaction entre la vision, l'audition, et la perception du goût	10
2. Influence des contextes mnésique et émotionnel sur notre jugement hédonique	13
2.1. Contexte mnésique	13
2.2. Contexte émotionnel.....	16
3. La mémoire au cœur de cette influence - l'émergence des connaissances dans le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002)	19
3.1. Les modèles de la mémoire.....	19
3.2. Un modèle système unique : le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002)	22
3.3. Des dimensions émotionnelles	24
3.4. Synthèse	28
4. Comment mesurer cette influence ? – Mesure de l'intensité de l'influent et mesure de l'influence	29
4.1. Méthodes subjectives	29
4.2. Méthodes objectives	32
CHAPITRE 2 : LA PUPILLOMETRIE COMME MESURE OBJECTIVE	39
1. La pupille	40
1.1. Anatomie	40
1.2. Physiologie de la motilité pupillaire	45
2. La pupillométrie comme mesure des activités cognitives et émotionnelles	47
2.1. La charge cognitive.....	47
2.2. L'encodage mnésique.....	58
2.3. Les stimuli émotionnels.....	63
2.4. Les stimuli gustatifs et olfactifs	69
2.5. Divers.....	70

3.	Les méthodologies actuellement utilisées en psychologie	72
3.1.	Acquisition des données.....	72
3.2.	Pré-traitements des données	76
3.3.	Traitement des données	80
4.	Synthèse	85
	PROBLÉMATIQUE	87
1.	Contexte	88
1.1.	L'objectif général	88
1.2.	Les hypothèses théoriques.....	88
2.	La démarche méthodologique	90
2.1.	Développement de l'outil.....	90
2.2.	Recherche des effets des stimuli chimiosensoriels sur le diamètre pupillaire	90
2.3.	Emotions, stimuli gustatifs et contexte.....	90
2.4.	Emotions, stimuli olfactifs et contexte.....	91
	PARTIE 2 : TRAVAUX EXPERIMENTAUX	93
	CHAPITRE 3 : PUPILLOMETRIE EN SITUATION DE DEGUSTATION – DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE	95
1.	Acquisition des données.....	96
1.1.	Participants.....	96
1.2.	Procédure	97
1.3.	Construction du test.....	98
1.4.	Appareil et installation	99
1.5.	Précautions à prendre	100
2.	Pré-traitements des données.....	103
2.1.	Extraction des données.....	103
2.2.	Nettoyage des données.....	103
2.3.	Correction de la ligne de base	104
3.	Traitement des données	106
3.1.	Courbes.....	106
3.2.	Pic de dilatation.....	106
3.3.	Comparaison temps par temps	107
3.4.	ACP	107
4.	Description des algorithmes Matlab mis à disposition	108

4.1.	Pré-sélection des sujets.....	109
4.2.	Pré-traitements des données.....	110
4.3.	Traitements des données.....	112
4.4.	Observation des résultats.....	114
5.	Discussion et conclusion.....	114
	CHAPITRE 4 : IMPACT DES STIMULI CHIMIOSENSORIELS SUR LE DIAMETRE PUPILLAIRE	117
1.	Objectif.....	118
2.	Méthodes	119
2.1.	Participants.....	119
2.2.	Matériel et installation.....	119
2.3.	Produits	119
2.4.	Procédure	122
2.5.	Analyse des données.....	124
3.	Résultats.....	124
3.1.	Solutions aqueuses.....	124
3.2.	Solutions hydro-alcooliques	132
4.	Conclusion	137
	CHAPITRE 5 : ETUDE DE LA REACTION PUPILLAIRE A DES STIMULI GUSTATIFS	139
1.	Expérience 1 – Stimuli gustatifs seuls	140
1.1.	Objectifs	140
1.2.	Méthodes	140
1.3.	Résultats.....	144
1.4.	Conclusion	150
2.	Expérience 2 – Stimuli gustatifs en contexte (Congruent vs non congruent).....	150
2.1.	Objectifs	150
2.2.	Méthodes	151
2.3.	Résultats.....	157
2.4.	Conclusion	166
3.	Expérience 3 – Stimuli gustatifs en contexte (Agréable Vs Désagréable).....	167
3.1.	Objectifs	167
3.2.	Méthodes	168
3.3.	Résultats.....	172

3.4.	Conclusion	187
4.	Conclusion générale du chapitre.....	187
	CHAPITRE 6 : ETUDE DE LA REACTION PUPILLAIRE A DES STIMULI OLFACTIFS	189
1.	Objectifs	190
2.	Méthodes	190
2.1.	Participants.....	190
2.2.	Appareil et installation	190
2.3.	Tâches et stimuli.....	191
2.4.	Procédure	192
2.5.	Analyse des données	194
3.	Résultats	196
3.1.	Evaluation de la pertinence des associations.....	196
3.2.	Appréciation des odeurs et des ambiances	196
3.3.	Réactions pupillaires	197
3.4.	Questionnaire d'émotions.....	206
3.5.	Lien entre la réponse pupillaire et les données déclaratives.....	210
3.6.	Impact de la congruence sur la notation hédonique et le temps de réponse à la question « Aimez-vous cette odeur ? ».....	211
4.	Conclusion	213
	DISCUSSION GENERALE	215
1.	Synthèse et discussion des résultats issus de ce travail.....	216
1.1.	La pupillométrie : considérations pratiques.....	217
1.2.	La pupillométrie : l'interprétation.....	223
1.3.	Pouvoir émotionnel et influence des émotions	230
2.	Perspectives de ce travail de thèse	235
2.1.	Méthodologie	236
2.2.	L'interprétation	238
2.3.	Pour aller plus loin.....	238
3.	Conclusion générale	239
	BIBLIOGRAPHIE	243
	ANNEXES	263

INTRODUCTION

« N'oublions pas que les petites émotions sont les grands capitaines de nos vies et qu'à celles-là nous y obéissons sans le savoir. » Vincent Van Gogh

« Calmer la faim n'a jamais été (et ne sera jamais) le seul rôle de la nourriture. Nous mangeons, non seulement du fait des manifestations de notre estomac, mais aussi pour assouvir notre appétit et répondre à nos émotions. Dès le premier instant où un parent donne un biscuit ou un bonbon à un enfant pour le consoler ou le calmer, la nourriture cesse de concerner uniquement le corps: elle prend une dimension affective. Dès le plus jeune âge, la nourriture est festive ou réconfortante; elle sert de remède contre l'ennui ou la déprime; elle réconforte lors des moments de détresse. Il n'y a rien d'anormal à cela, bien au contraire. Il est évident qu'on ne refuse pas une part de gâteau d'anniversaire, qu'on se récompense avec quelques biscuits ou un peu de chocolat après un travail difficile, ou qu'on aime bien boire un verre de vin ou de bière au cours d'une soirée. » (*The European Food Information Council* - <http://www.eufic.org/article/fr/artid/alimentation-emotions/>)

Ainsi, il est clair qu'il existe un lien évident entre émotions et alimentation. Et d'ailleurs, nos émotions influencent largement notre perception des aliments. En effet, les perceptions sensorielles et hédoniques résultent de processus complexes d'intégration, qui ne sont pas seulement rationnels, mais qui sont aussi fondés sur des sentiments, des émotions et des souvenirs (Hoerger et al., 2012 ; Loewenstein et al., 2001). Il est important de noter que nous prenons par jour plus de deux cents décisions alimentaires (Wansink & Sobal, 2007 ; Wansink, 2006). Il est ainsi évident que réfléchir consciemment à chacune de ces décisions est impossible. Et en effet, ces mêmes auteurs ont montré que 90% de ces décisions sont prises de manière inconsciente en réaction à des variables contextuelles. Ainsi, afin d'appréhender au mieux le comportement du consommateur, il est devenu indispensable de comprendre les émotions et le rôle fondamental qu'elles jouent dans la décision.

Ces émotions peuvent être provoquées par la consommation d'un produit ou bien par son contexte de consommation et dépendent très largement du consommateur. En effet, les caractéristiques du consommateur vont avoir un large rôle à jouer sur l'état émotionnel comme son état physiologique, sa familiarité (ou niveau d'expertise) relative au produit, sa culture, etc. Bien que plusieurs études aient déjà proposé des méthodes de mesure des émotions, il apparaît qu'en évaluation sensorielle, celles-ci se soient limitées à des méthodes subjectives telles que les questionnaires. On peut par exemple citer des questionnaires descriptifs, tel que le questionnaire EsSense ProfileTM de King, Meiselman & Carr (2010). Ce questionnaire se compose de 39 items d'émotion que le sujet doit évaluer via une échelle allant de «Pas du tout» (1) à «Extrêmement» (5). D'autres questionnaires ont été utilisés pour les parfums ou, plus largement, pour les odeurs (Chrea et al., 2009 ; Porcherot et al., 2010 ; 2012 ; Ng, Chaya & Hort, 2013). Ce type de questionnaire, en particulier lorsqu'il est utilisé pour les produits alimentaires, doit être adapté et validé pour chaque produit. De plus, il reste une mesure subjective et limitée car les sujets ont du mal à exprimer précisément leurs émotions par des mots.

Ainsi, afin de parer à la subjectivité de la mesure des émotions il faut coupler les mesures actuelles à des méthodes plus objectives telles que les mesures physiologiques afin de suivre les réactions spontanées du consommateur sans passer par le processus cognitif d'expression et de la verbalisation des sensations et des opinions.

« Le visage rouge, le cœur battant, les muscles tendus, la personne qui vient de sentir un échantillon d'une odeur extrêmement désagréable, présente toutes les

caractéristiques de la colère. Les capteurs fixés sur sa poitrine et sa main ont enregistré une tachycardie et une vasodilatation des capillaires sanguins responsables de la rougeur cutanée. Ces transformations physiologiques sont typiquement provoquées par la colère. Pourtant si on lui demande de traduire par des mots son émotion, il affirme avoir éprouvé du dégoût »

(Beros, 2003 – rapport des travaux d'Olivier Robin).

La pupillométrie qui désigne la mesure du diamètre de la pupille et permet la quantification des dilatation-contraction de la pupille est l'une de ces mesures physiologiques. Elle est utilisée depuis de nombreuses années en psychologie. Notamment, depuis les années 1960, la recherche sur les stimuli cognitifs et émotionnels s'est montrée très active. Les chercheurs ont montré que la taille de la pupille varie en fonction de la charge cognitive (Hess & Polt, 1964 ; Bradshaw, 1968 ; Ullwer, Ries, Foth & Van der Meer, 2010) mais aussi de la charge émotionnelle ou encore des préférences (Barlow, 1969 ; Partala & Surakka, 2003 ; Bradley, Miccoli, Escrig & Lang, 2008 ; Laeng, 2010). D'autres types de stimuli ont également été étudiés tels que le processus de la mémoire (Laeng, 2010 ; Sirois & Jackson, 2010 ; Wu, Laeng & Magnussen, 2010) ou la violation des attentes (Gredebäck, 2010 ; Hepach & Westermann, 2010).

L'objectif de cette thèse est de contribuer à la compréhension de l'influence des émotions sur les perceptions sensorielles et hédoniques **en développant un outil de mesure objectif fondé sur la pupillométrie**. Nous avons ainsi dans un premier temps tenté d'appréhender le pouvoir émotionnel de stimuli gustatifs. Les applications se sont ensuite étendues aux stimuli olfactifs. Chaque type de stimulus a ensuite été testé en contexte à l'aide de stimuli auditifs. Enfin, une partie du travail s'est attaché à identifier l'impact de facteurs tels que des émotions positives ou négatives provoquées ou la congruence sur le jugement hédonique.

La première partie présente les aspects théoriques rattachés à ce travail de thèse.

Le **chapitre 1** résume les principales influences sur notre perception hédonique ou sensorielle des aliments. Egalement il vise à expliquer comment notre perception est influencée et comment mesurer cette influence.

Le **chapitre 2** expose tout ce qui se rapporte à la pupillométrie. L'anatomie et la physiologie de la pupille sont dans un premier temps présentées. Puis une revue des études de pupillométrie pour la mesure des activités cognitives et émotionnelles est présentée. Enfin, les méthodologies de pupillométrie actuellement utilisées en psychologie sont détaillées.

Suite à l'exposé du cadre théorique, une seconde partie, constituée de quatre chapitres, expose l'ensemble des travaux réalisés au cours de cette thèse.

Une des premières réalisations de ce travail de thèse a été le **développement d'une procédure standard d'analyse pupillométrique**. En effet, bien que de nombreuses études de pupillométrie soient rapportées dans la littérature, il n'existe pas vraiment de méthode canonique pour analyser les données pupillométriques. De plus, bien qu'il soit bien établi que le diamètre pupillaire est directement affecté par les stimuli émotionnels, très peu de données existent sur les stimuli olfactifs, gustatifs ou trijumeaux. En effet, à notre connaissance, seuls deux articles sur ce type de stimuli ont été publiés. En 1966, Hess & Polt ont montré que les changements de taille de la pupille pouvaient être liés aux différences de goût. Plus de 40 ans plus tard, Schneider et al. (2009) ont montré que les variations de diamètre de la pupille indiquent des différences entre les modalités et la force de stimuli olfactifs, mais ne sont pas liées à la valeur hédonique des odeurs.

Ce développement s'est fait dans l'optique d'une application **en situation de dégustation** en prenant en compte les contraintes inhérentes à cette situation particulière. Le développement de cette méthodologie fait l'objet du premier chapitre de la partie expérimentale, le **chapitre 3**. Ce chapitre regroupe l'ensemble des recommandations que nous sommes en mesure de faire pour accompagner quiconque dans la mise en place d'une étude pupillométrique, et plus spécifiquement, en situation de dégustation.

Le second chapitre de la partie expérimentale, le **chapitre 4**, rapporte les résultats de la recherche systématique des **possibles effets de différents stimuli chimio-sensoriels sur le diamètre pupillaire**. En effet, travailler sur des stimuli gustatifs implique d'être confronté à des caractéristiques chimiosensorielles variables (sucre, amertume, acidité, etc.). Afin de pouvoir comparer la réactivité pupillaire consécutive à la mise en bouche de différents stimuli gustatifs il est important de s'assurer que ces caractéristiques n'ont pas elles-mêmes, une influence sur le diamètre pupillaire.

Le troisième chapitre de cette partie, le **chapitre 5**, fait état de différentes études exploratoires mises en place pour évaluer le pouvoir émotionnel des stimuli gustatifs seuls et en contexte (stimuli auditifs). Successivement, sont testés des stimuli gustatifs seuls, puis dans un contexte mnésique (congruent vs non congruent) et enfin dans un contexte émotionnel (agréable vs désagréable). Egalement, une partie du travail s'est attaché à identifier l'impact d'émotions positives ou négatives provoquées sur le jugement hédonique.

Nous avons ensuite étendu les applications aux stimuli olfactifs et ainsi le dernier chapitre de cette partie expérimentale, le **chapitre 6**, rapporte la dernière étude exploratoire mise en place visant à évaluer le pouvoir émotionnel des stimuli olfactifs. Ces stimuli ont notamment été testés dans un contexte mnésique (congruent vs non congruent) dont l'influence a été testée.

PARTIE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

CHAPITRE 1 : NOTRE PERCEPTION DES ALIMENTS SOUS INFLUENCE

1. Multimodalité ou intégration multimodale : influence de nos différents sens sur notre jugement perceptif

1.1. Définition

L'intégration multimodale consiste à étudier comment l'information provenant des **différentes modalités sensorielles**, comme la vue, l'ouïe, le toucher, l'odorat et le goût, peut être **intégrée par le système cognitif**. De cette intégration résulte notamment une **représentation cohérente des objets** et l'accès à des expériences perceptives significatives. En effet, l'intégration multisensorielle est au cœur du comportement adaptatif car elle nous permet de percevoir un monde cohérent d'entités perceptives. Exemple : Association couleurs (vision) et odeurs et erreur de jugement (ex : vin blanc coloré en rouge – Morrot, Brochet & Dubourdieu, 2001).

Il existe différents types d'interaction comme l'interaction goût-odeur, l'influence des systèmes tactile et trigéminale sur la perception du goût et de l'odeur et l'influence de la vision ou de l'ouïe sur la perception du goût, de la texture, etc. Cette partie passera en revue ces différentes interactions en ne s'attachant qu'aux **effets sur la perception sensorielle ou les préférences**. Les effets comportementaux (quantité consommée, vitesse de consommation, etc.) ne seront pas abordés.

1.2. Interaction entre la perception du goût et de l'odeur

Il n'est pas rare de constater qu'une personne a des difficultés à reconnaître un aliment en se pinçant le nez ou encore d'entendre une personne qualifier une odeur de « sucrée », or la saveur sucrée relève de perceptions gustatives (e.g., Burdach, Kroeze & Koster, 1984 ; Voirol & Daget, 1989). Il existe également l'illusion du « goût de la température » (ex : goût salé d'un glaçon lorsque placé sur le côté de la langue) (Cruz & Green, 2000) ou encore l'évolution de l'intensité de l'odeur de menthol d'un chewing-gum par la libération de sucre (Davidson, J. M. et al., 1999). Tous ces exemples suggèrent qu'il existe une importante interaction entre les différents composants de la flaveur (ensemble complexe des sensations olfactives, gustatives et trigéminales (sensation irritante ou agressive dans la cavité buccale) perçues au cours de la dégustation – définition AFNOR). Toujours dans l'interaction goût-odeur, on retrouve le phénomène de l'amélioration du goût sucré. Lorsque des odeurs « sucrées » (ne possédant pas de goût : ne pouvant pas être détectées par les récepteurs du goût) sont ajoutés comme des arômes à des solutions que les participants ont en bouche, ils ont tendance à augmenter la perception du sucré de ces solutions (Cliff & Noble, 1990 ; Frank & Byram, 1988; Schifferstein & Verlegh, 1996) (exemple : odeur caramel + solution sucrée). Inversement, l'ajout d'odeurs sucrées peut diminuer la perception d'autres goûts comme l'acide (odeur caramel + acide citrique) (Stevenson et al., 1999). Le Tableau 1 propose une synthèse des conclusions principales des études passées en revue dans ce paragraphe.

Tableau 1. Etudes portant sur la multimodalité (goût-odeur)

Références	Conclusions principales
Frank & Byram, 1988	L'odeur de fraise améliore le pouvoir sucrant du saccharose. Cet effet est odeur-dépendant (pas d'effet avec l'odeur de beurre d'arachide) et saveur-dépendant (pas d'effet sur la saveur salée). 85% de la capacité de la substance odorante à améliorer le pouvoir sucrant du saccharose est éliminé en pinçant les narines
Burdach et al., 1984	La détection de substances odorantes en solutions aqueuses additionnées ou non de sucre est équivalente par voies orthonasale et rétronasale mais l'ajout de saccharose entraîne une diminution de la détection des odeurs et une tendance à qualifier les odeurs comme étant sucrées
Cliff & Noble, 1990	L'intensité de la saveur sucrée de solutions variant en concentrations de glucose et essence de pêche (arôme sucré) augmente avec les concentrations en glucose et d'arôme tandis que l'intensité du fruité n'augmente qu'avec la concentration en arôme
Cruz & Green, 2000	Le chauffage ou le refroidissement de petites zones de la langue peut provoquer des sensations de goût - exemples : -le réchauffement du bord antérieur de la langue évoque le sucré -le refroidissement évoque l'acidité et/ou le salé
Davidson et al., 1999	La perception de la saveur de menthe d'un chewing-gum à la menthe suit la libération de saccharose plutôt que celle de menthone
Schifferstein & Verlegh, 1996	L'intensité sucrée perçue de combinaisons sucre/odorant est augmentée lorsque celles-ci sont congruentes (saccharose/fraise et saccharose/citron Vs saccharose/jambon)
Stevenson et al., 1999	L'ajout d'odeurs comme agents aromatisants dans des solutions de saccharose ou d'acide citrique peut respectivement augmenter ou supprimer la perception du sucré ou supprimer l'acidité (exemple : l'odeur caramel supprime l'acidité et augmente le sucré)
Voirol & Daget, 1989	Les concentrations en arôme sont mieux discriminées au nez qu'en bouche. L'effet de la température est plus perceptible par voie nasale qu'orthonasale. L'addition de NaCl et de Monosodium glutamate (MSG) augmente l'intensité de l'odeur et diminue l'effet de la température.

1.3. Interaction entre les systèmes tactile et trigéminal et la perception du goût et de l'odeur

Les systèmes tactile et trigéminal peuvent également interagir avec la perception du goût et l'odorat. Le système trigéminal fournit des informations concernant l'irritation chimique et la nociception (phénomènes permettant l'intégration au niveau du système nerveux central d'un stimulus douloureux via l'activation des nocicepteurs), ainsi que des informations concernant la température, la texture et la consistance de la nourriture et l'ensemble de ces sources d'information influencent la perception globale de la saveur que nous expérimentons. En ce qui concerne l'**irritation**, la présence d'un agent irritant (ex : capsaïcine) peut moduler le goût, par exemple elle peut diminuer la perception du sucré et dans une moindre mesure du salé (lorsqu'il est présenté à une concentration faible alors que la capsaïcine est en forte concentration). Réciproquement, la sensation de brûlure de la capsaïcine peut être modulée par les exhausteurs de goût, par exemple l'ajout de NaCl va augmenter la sensation de brûlure (Prescott, Allen & Stephens, 1984 ; Prescott & Stevenson, 1995) et la sensation de brûlure se dissipera plus rapidement dans des solutions acides ou sucrées que dans des solutions amères (Stevens & Lawless, 1986). Les

variations de température peuvent avoir une action similaire aux agents irritants en augmentant la sensation de brûlure ou encore en modulant l'intensité globale (Prescott, Allen & Stephens, 1984). De même, les composés olfactifs tels que l'acétate de butyle (qui a une odeur fruitée) peut susciter l'activité du nerf trijumeau (Cain, 1974). En ce qui concerne l'influence de la **texture**, il a été démontré que les stimuli somesthésiques modulaient à la fois le goût et la perception de saveurs ou bien étaient modulés par ces mêmes propriétés. Par exemple, il a été montré qu'en augmentant les niveaux d'acide citrique, ou de NaCl on diminuait les viscosités perçues de différentes solutions alors qu'en augmentant les concentrations en saccharose, on entraînait de petites augmentations de viscosité perçue (Christensen, 1980). Réciproquement, l'augmentation de la viscosité dans des solutions acides a diminué l'intensité perçue du goût acide (Sediva et al., 2004). Les nombreuses interactions entre le signal des récepteurs du goût et la texture conduisent Green (2001) à suggérer que tous les récepteurs de la bouche doivent effectivement être considérés comme constituant un système somesthésique intégré. Les conclusions principales des études passées en revue dans ce paragraphe sont résumées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Etudes portant sur la multimodalité (tactile/trigéminal-odeur/goût)

Références	Conclusions principales
Cain, 1974	Le nerf trijumeau contribue à l'intensité perçue de stimuli à forte intensité
Christensen, 1980	L'augmentation de la concentration en acide citrique et NaCl diminue la viscosité perçue tandis que l'augmentation de la concentration de saccharose entraîne de petites augmentations de viscosité perçue (Il n'y a pas d'effet de la caféine sur la viscosité perçue)
Prescott & Stevenson, 1995	L'ajout de capsaïcine dans des solutions sucrées et acides contenant un arôme (orange ou vanille) supprime la perception du sucré et diminue l'intensité de la flaveur (phénomènes corrélés) mais n'affecte pas l'acidité
Prescott, Allen & Stephens, 1984	Il existe des interactions entre le saccharose, le NaCl, la capsaïcine et la température (observées dans des solutions de saccharose ou de NaCl et de la soupe) : La capsaïcine supprime la perception du sucré et dans une moindre mesure la perception du salé (dans des solutions basse concentration en NaCl quand elle est en forte concentration) Le NaCl augmente la sensation de brûlure de la capsaïcine L'intensité globale des mélanges saccharose/capsaïcine est entièrement déterminée par la concentration en capsaïcine La variation de température influence la sensation de brûlure et l'intensité globale des mélanges saccharose/capsaïcine mais ne module pas les effets de la capsaïcine sur le goût
Sediva et al., 2004	L'augmentation de la viscosité par l'ajout d'agent épaississant dans des solutions acides diminue l'intensité du goût acide
Stevens & Lawless, 1986	Une irritation orale intense induite par rinçages avec des solutions sucrées, amères ou salées ou de l'eau contenant de la capsaïcine ou de la pipérine (agents irritants) montre une baisse de l'irritation plus rapide pour les solutions acides et sucrées, intermédiaire pour les solutions salées et l'eau, et plus lente pour les solutions amères et la condition non-exhausteur de goût

1.4. Interaction entre la vision, l'audition, et la perception du goût

Il peut être également intéressant de discuter brièvement le rôle que les repères visuels et auditifs jouent dans la perception du goût. Par exemple, l'identification des odeurs ou saveurs est souvent compromise quand elles sont présentées sans les **indices de couleur (ex : solution odorante de fraise incolore plutôt que rouge)** ou lorsqu'elles sont associées à une couleur inappropriée (ex : solution

à l'orange colorée en vert) (e.g., Blackwell, 1995; Morrot et al., 2001 ; Zellner & Kautz, 1990; voir aussi Clydesdale, 1984, 1993). De la même manière, la couleur peut influencer la perception d'une saveur comme l'acidité (Zampini et al., 2007 ; 2008 ; Fernández-Vázquez et al., 2013). Et en effet, il existe des associations odeur-couleur consensuelles pour de nombreuses odeurs et notamment des odeurs très similaires peuvent être associées à des couleurs différentes (Maric & Jacquot, 2013). De manière plus étonnante il existe également des associations forme-saveur. Par exemple, Deroy et Valentin (2011) ont montré une correspondance significative entre le sucré, le volume, et la rondeur et entre l'amertume, la finesse et des formes angulaires lors de la caractérisation de la flaveur de bières ; le sujet devait sélectionner le dessin ou croquis le mieux adapté pour caractériser le goût de bière parmi une liste des propositions (ex : carré, triangle, cube, etc.). De la même manière, Spence & Gallace (2011) ont montré que certains aliments étaient plus fortement associés aux formes anguleuses tandis que d'autres étaient plus fortement associés aux formes arrondies. Proche des associations saveur-forme, on retrouve également des associations odeur-symbole (Seo et al., 2010). Les conclusions principales des études passées en revue dans ce paragraphe sont résumées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Etudes portant sur la multimodalité (vision- odeur/goût)

Références	Conclusions principales
Blackwell, 1995	La coloration inappropriée de solutions aux fruits conduit à une baisse de l'identification de l'odeur de celles-ci et de moins bonne performance dans le classement en fonction de l'intensité/force d'odeur
Deroy & Valentin, 2011	Il existe une correspondance significative entre les saveurs et la forme/la taille de croquis/dessin : correspondance entre le sucré, le volume, et la rondeur et correspondance entre l'amertume, la finesse et les formes angulaires (observé sur des bières)
Fernández-Vázquez et al., 2013	Un jus d'orange coloré en verdâtre est perçu plus acide
Maric & Jacquot, 2013	Il existe des associations odeur-couleur significatives qui diffèrent de manière importante entre des odeurs très similaires
Morrot et al., 2001	Un vin blanc coloré en rouge est décrit olfactivement comme un vin rouge
Seo et al., 2010	Il existe des associations entre odeurs et symboles abstraits significatives : un symbole congruent peut moduler l'intensité perçue et l'appréciation d'une odeur (augmentation de l'intensité perçue et de l'appréciation de PEA et diminution de l'appréciation du 1-butanol) ainsi que l'amplitude (augmentation) et le temps de latence (diminution)
Spence & Gallace (2011)	Certains aliments sont plus souvent associés aux formes anguleuses alors que d'autres aliments sont plus souvent associés aux formes arrondies
Zampini et al., 2008	La saveur d'une boisson fruitée est mieux identifiée lors de l'ajout d'acides de fruits (citrique et malique) et /ou lorsque les solutions sont colorées de manière appropriée et les perceptions d'intensité de saveur et d'amertume augmentent avec la présence des acides de fruits
Zampini et al., 2007	La coloration inappropriée de solutions entraîne une diminution des performances en termes d'identification de saveur et de notation d'intensité
Zellner & Kautz, 1990	Des solutions odorantes sont perçues comme plus intenses lorsqu'elles sont colorées plutôt qu'incolores, et ceci quelle que soit la congruence ; ce qui montre que l'effet n'est pas dû à une pré-exposition couleur-odeur

Jusqu'ici, l'**influence de l'audition** sur la perception des aliments a été principalement axée sur les **propriétés texturales** des aliments; montrant, par exemple, que la croustillance perçue (Zampini & Spence, 2004) ou la perception de la carbonatation (Zampini & Spence, 2005) de l'alimentation varie en fonction des indices auditifs qui sont présentés. Mais depuis peu, l'étude de l'influence de l'audition s'est étendue aux **propriétés gustatives** des aliments ; c'est ainsi qu'il a été montré que la perception ou l'appréciation du goût d'un aliment pouvait être modulée par un son grâce à des associations goût-flaveur/notes de musique-sons existantes chez chacun (Crisinel & Spence, 2009 ; 2010 ; 2011) ou encore à des associations Instrument/valeur hédonique-familiarité (Crisinel & Spence, 2010 ; 2012). L'existence de ces associations influence notre perception, par exemple, il a été observé une augmentation de la perception d'amertume dans des biscuits lors de la diffusion d'un son supposé amer (Crisinel et al., 2012) ou encore une modulation du profil de divers produits par la musique (North, 2011 ; Zander, 2006). Enfin, le profil ou l'appréciation d'un produit peut également être modulé par un simple son évocateur. Il a par exemple été observé une augmentation de la perception de la saveur bacon dans une crème glacée « bacon et œufs » lors de la diffusion d'un son de bacon sur la poêle ou encore une augmentation de l'appréciation d'huîtres quand leur dégustation était accompagnée de sons de la mer (Spence, 2009). Enfin, dans un registre proche, plutôt **linguistique**, il existe également des associations saveurs ou aliments et mots ou non-mots, par exemple les chips et la sauce à la canneberge sont évalués comme étant plus "takete" que le fromage de brie ou encore le chocolat à la menthe est considéré comme plus "kiki" que le chocolat ordinaire (Gallace et al., 2011 ; Spence & Gallace, 2011).

Les conclusions principales des études passées en revue dans ce paragraphe sont résumées dans le Tableau 4.

Tableau 4. Etudes portant sur la multimodalité (audition)

Références	Conclusions principales
Crisinel & Spence, 2009	Il existe une association intermodale significative entre sons aigus et aliments acides et sons graves et aliments amers
Crisinel & Spence, 2010	Les saveurs sucrée et acide sont associées aux sons aigus tandis que les saveurs umami et salée sont associées aux sons graves Des associations avec des classes d'instruments sont également observées mais sont principalement conduit par la valeur hédonique et la familiarité
Crisinel & Spence, 2011	Les associations goût-flaveur/notes de musique décrites dans la littérature sont confirmées (Crisinel & Spence, 2010) sur des stimuli alimentaires plus complexes ; exemples : Ton : Citron, fleur d'oranger > Vanille Type d'instrument : Pas d'aromatisation : Piano ; Citron, Vanille : Cuivre
Crisinel & Spence, 2012	Lors d'associations entre chocolats et notes de musique (ton et classe d'instruments), une corrélation générale entre le caractère agréable et le ton est observée Egalement, le caractère agréable affecte le choix d'instrument
Crisinel et al., 2012	L'amertume de biscuits ("cinder toffee" (biscuits anglais au caramel)) est surévaluée lorsqu'un son supposé amer est joué par rapport à un son supposé sucré
North, 2011	Une condition sonore (musique traduisant les caractères puissant et lourd, subtil et raffiné, acidulé et rafraîchissant, ou moelleux et doux) peut influencer la notation d'un vin (rouge ou blanc) en augmentant la note de la caractéristique correspondant à la musique diffusée par rapport au silence

Spence, 2009	Les huîtres sont plus appréciées lors de l'écoute de bruits de la mer par rapport à des bruits de basse-cour
	La saveur bacon de crèmes glacées saveur « bacon et œufs » est perçue plus intense durant l'écoute du son du "grésillement" du bacon dans une poêle ou du son de poules dans une basse-cour
Gallace et al. (2011) / Spence & Gallace (2011)	Il existe des associations intermodales solides entre des aliments complexes/des saveurs et des mots. Certains aliments sont plus souvent associés aux non-mots aigus tels que "kiki" et "takete" dont la prononciation nécessite une inflexion forte de la bouche (ex : eau gazeuse, jus de canneberge) alors que d'autres aliments sont plus souvent associés à des mots plus "doux" tels que des pseudos-mots aux tons plus bas comme "bouba" ou "maluma" (ex : eau plate, fromage de brie)
Zampini & Spence, 2004	Lors de l'évaluation de la croustillance et de la fraîcheur perçues de chips de pommes de terre avec des sons renvoyés au sujet modifiés (intensité sonore et/ou fréquence), plus l'intensité ou la fréquence est haute, plus la chips est évaluée croustillante et fraîche
Zampini & Spence, 2005	Lors de l'évaluation auditive de la carbonatation perçue d'eaux gazeuses avec oreille plus ou moins éloignée du verre, plus le verre d'eau est proche du sujet, plus l'eau est évaluée pétillante
	Lors de l'évaluation auditive de la carbonatation perçue d'eaux gazeuses avec sons renvoyés au sujet modifiés (intensité sonore et/ou fréquence), plus l'intensité ou la fréquence est haute, plus l'eau est évaluée pétillante
	Lors de l'évaluation en bouche de la carbonatation perçue d'eaux gazeuses avec les sons de la première expérience renvoyés, aucun effet son n'est observé
Zander, 2006	En fonction du style musical de publicités radio, la musique peut conduire à différentes impressions du sponsor ou de la marque sans affecter les évaluations générales du produit

Dans ce registre, Knöferle & Spence (2012), Spence (2012) et Zampini & Spence (2010) ont publié des revues qui proposent respectivement un **résumé des correspondances intermodales entre saveurs de base et éléments sonores** démontrées à ce jour, une revue de la recherche sur le **rôle de l'audition dans la perception de la saveur et le comportement alimentaire** et enfin une revue sur les recherches mettant en évidence **les effets importants que la musique et d'autres stimuli auditifs peuvent avoir sur les choix alimentaires**.

2. Influence des contextes mnésique et émotionnel sur notre jugement hédonique

Les contextes mnésique et émotionnel ont une influence certaine sur notre jugement hédonique. Cette partie passera en revue les influences de ces deux contextes en ne s'attachant qu'aux **effets sur les préférences** et non aux effets comportementaux (quantité consommée, vitesse de consommation, etc.).

2.1. Contexte mnésique

2.1.1. Familiarité

Dès le plus jeune âge, le goût et le degré de familiarité influencent le comportement vis-à-vis de la nourriture. Un goût pour le sucré et une aversion pour l'amertume sont considérés comme des traits

innés de l'homme, présents dès la naissance (Steiner, 1977). Les préférences de goût et les aversions alimentaires se développent au travers des expériences et sont influencées par nos attitudes, croyances et attentes (Clarke, 1998). Dans le cas du goût et de l'odorat, il semblerait que « plus c'est familier, plus on aime » (Zajonc, 1968). Zajonc (2001) explique dans une revue sur l'exposition répétée que ceci s'expliquerait par le fait que l'« on préfère ce qui est familier parce qu'on aime reconnaître ce qu'on connaît déjà » et de ce fait que l'appréciation d'un stimulus augmente lors d'une exposition répétée ainsi que celle de stimuli similaires. Autre explication, selon Winkielman et al. (2003) ou encore Reber, Schwarz & Winkielman (2004), la familiarité va influencer la fluidité du processus de perception et « plus le processus de perception avec lequel est traité un objet est fluent, plus la réponse à cet objet sera positive ». Deroy (2010) met en avant d'autres hypothèses qui ont également été émises pour tenter d'expliquer pourquoi « plus c'est familier, plus on aime ». La première hypothèse est de penser qu'il s'agit d'un principe de rationalité ou plus explicitement d'une stratégie de minimisation des risques et de maximisation de l'utilité (apparenté à la néophobie). Cependant, face à la nouveauté, il n'est pas toujours rationnel de préférer le familier. Ainsi, la deuxième hypothèse est de penser que la préférence pour le familier correspond plutôt à un biais (processus mis en œuvre de façon spontanée, incontrôlée ou automatique). Toujours selon Deroy (2010), étudier l'effet de la familiarité comme un biais, suppose que l'on distingue conceptuellement 2 types d'effet :

- l'effet de familiarité **objective**, résultant d'une exposition répétée
- l'effet de familiarité **subjective**, résultant d'un sentiment d'aise, d'intimité (familiarité affective) ou d'un sentiment de connaître/reconnaître (familiarité épistémique).

Si l'on étudie uniquement la familiarité objective on cherche à savoir quelles sont les habitudes des consommateurs (nombre/fréquence d'exposition) pour les corrélérer aux choix ou préférences. Mais la familiarité subjective a aussi son importance et mérite également d'être prise en compte. Cependant, savoir comment s'articulent les deux aspects de cette familiarité (affective et épistémique) pour influencer les préférences n'est pas si simple et les données dont on dispose aujourd'hui ne permettent pas de répondre à toutes les interrogations.

2.1.2. Culture

Selon la revue EUFIC d'avril 2005, les influences culturelles conduisent à une différence dans la consommation habituelle de certains aliments et dans les traditions de préparation, ce qui peut influencer les préférences. De plus, certains aliments sont familiers pour certaines cultures alors qu'ils ne le sont pas pour d'autres cultures. On rejoint là l'effet de la familiarité cité plus haut.

Dans ce registre, Pagès et al. (2007) ont mis en évidence, lors d'une expérience où des Français et des Pakistanais étaient invités à établir le profil sensoriel de biscuits (français et pakistanais) et donner leurs préférences, que malgré des profils établis équivalents, les sujets avaient une préférence pour les biscuits de leur propre pays en terme hédonique. Plus tôt, Pangborn et al. (1988) avaient obtenu des résultats similaires par la mise en évidence d'une modulation de la préférence pour des arômes alimentaires en fonction du pays. Aussi, dans le même registre, Chrea et al. (2004) ont mis en évidence un jugement perceptif d'odeurs variable en fonction de la nationalité et ce, malgré un tri selon

similitudes consensuel, de plus, les Français et les Américains différenciaient les caractéristiques florales et fruitées alors que pour les Vietnamiens, elles étaient équivalentes.

2.1.3. Congruence

La congruence est définie comme l'état de ce qui est en accord avec quelque chose. La perception de la congruence est ainsi reliée au contexte mnésique car l'établissement d'un accord entre deux choses se fait au travers de la récupération de nos souvenirs (ex : « Je sais que le son des voitures est congruent avec la ville car je me souviens que quand je suis en ville, j'entends le bruit des voitures »). La congruence peut influencer l'appréciation. Dans ce registre, Seo et al. (2009) et Seo & Hummel (2011) ont par exemple montré une augmentation de l'appréciation d'odeurs lors de l'écoute de sons congruents par rapport à des sons non congruents. Plus tôt, Schifferstein et Verlegh (1996) font une observation similaire lors de la notation du caractère agréable de 3 combinaisons sucre/odorant (fraise, citron et jambon), le caractère agréable est amélioré pour les combinaisons congruentes (saccharose/fraise ou citron) et diminué pour la combinaison non congruente (saccharose/jambon).

Les études passées en revue dans cette seconde partie sont résumées dans le Tableau 5.

Tableau 5. Etudes et revues portant sur l'influence du contexte mnésique (Culture, Congruence et familiarité)

Catégorie	Références	Description de l'étude
Familiarité	Reber, Schwarz, & Winkielman, 2004	La répétition, la symétrie ou encore l'amorçage peuvent améliorer la fluidité de traitement et globalement "plus le processus de perception avec lequel est traité un objet est fluent, plus la réponse à cet objet sera positive"
	Winkielman, P. et al., 2003	La « fluidité » a un impact positif sur l'évaluation
	Zajonc, 1968	"plus on est familier, plus on aime"
Culture		Le jugement perceptif d'odeurs (8 jugements perceptifs dont le caractère agréable et l'appréciation) peut être variable en fonction de la nationalité (Français, Américains ou Vietnamiens) malgré une classification consensuelle (tri selon similitudes)
	Chrea et al. 2004	La classification d'odeurs florales et fruitées peut être consensuelle entre ces mêmes différentes nationalités malgré des qualifications différentes (ex : Français et Américains : florales ≠ fruitées ; Vietnamiens : florales = fruitées)
	Pagès et al., 2007	Lors de l'évaluation (profil) de 8 biscuits (français et pakistanais) par des Français et des Pakistanais, on note un profil équivalent par les français et les pakistanais mais en termes hédonique, France ≠ Pakistan ; les biscuits de son propre pays de son propre pays sont préférés
	Pangborn et al., 1988	Lors de la notation hédonique de 22 odeurs dans 16 pays, on remarque une préférence variable en fonction du pays

Congruence	Schifferstein & Verlegh, 1996	Lors de la notation de l'intensité du sucré, du caractère agréable et de la congruence de 3 combinaisons sucre/odorant (fraise, citron et jambon), on observe une amélioration du caractère agréable pour les combinaisons congruentes et une diminution pour la combinaison non congruente (saccharose/jambon)
	Seo et al., 2009	Lors de la notation hédonique d'odeurs pendant l'écoute de sons congruents, non congruents ou neutres, on observe une appréciation plus élevée lors des associations congruentes
	Seo & Hummel, 2011	Les odeurs sont jugées plus agréables lors de l'écoute d'un son congruent par rapport à un son non congruent mais (pas d'effet sur l'intensité perçue)

2.2. Contexte émotionnel

2.2.1. Environnement social

Les influences de l'environnement social se réfèrent à l'impact qu'une ou plusieurs personnes ont sur le comportement alimentaire des autres. Lorsque l'on s'intéresse aux préférences alimentaires, l'influence de l'environnement social peut être négative comme dans l'exemple de King et al. (2004) qui mettent en évidence une préférence pour une même pizza dans un contexte social faible (self-service) en comparatif à un contexte social important (service de restaurant). Ils montrent également que cet effet est produit-dépendant, c'est-à-dire que l'on ne le retrouve que pour la pizza et non pour les autres produits testés (salade et thé glacé). Mais l'environnement social n'a pas toujours une influence sur les préférences comme le montrent King et al. (2007) qui ne mettent en évidence aucun effet de l'interaction sociale lors de la mesure de l'acceptation par les consommateurs d'aliments et de boissons en faisant varier cette interaction ou encore Edwards et al. (2013) qui de la même manière montrent que l'acceptabilité d'un repas reste inchangée qu'il soit consommé seul ou avec d'autres personnes. Ainsi, bien que l'environnement social peut influencer les préférences, il joue surtout un rôle dans le comportement de consommation en augmentant par exemple la quantité consommée en présence de plusieurs individus (De Castro, 1997 ; Engell et al., 1996) ou en amenant le consommateur à augmenter ou diminuer sa consommation alimentaire en fonction du comportement adopté par ses pairs (Herman et al., 2003 ; Hermans et al., 2009 ; 2010).

2.2.2. Le lieu et son ambiance

Le **lieu** de consommation peut également largement influencer nos préférences. Edwards et al. (2003) ont par exemple montré qu'un même plat est préféré lorsqu'il est consommé au restaurant plutôt que dans des lieux institutionnels. Dans le même registre, Meiselman et al. (2000) ont eu une conclusion similaire en mettant en évidence une préférence pour un même plat au restaurant par rapport au laboratoire et en dernier dans une cafétéria. Dans le même ordre d'idée, Hersleth et al. (2003) ont mis en évidence une meilleure appréciation de vins en salle de réception par rapport au laboratoire et aussi Petit & Sieffermann (2007) montrent que la consommation de café glacé dans deux conditions laboratoire (laboratoire classique et laboratoire avec environnement modifié pour se rapprocher de

conditions naturelles) amènent à des conclusions similaires en termes de préférence alors que ces conclusions diffèrent hors laboratoire.

L'**ambiance** fait également partie des facteurs influant les choix ou préférences. Par exemple, Oberfeld et al. (2009) ont montré que des mêmes vins ont été mieux notés lorsqu'ils ont été testés dans un environnement avec un éclairage ambiant à couleur dominante bleue ou rouge par rapport au même environnement avec un éclairage ambiant à couleur dominante verte ou blanche. Dans le même registre, Sester et al. (2013), ont montré par l'utilisation de bars immersifs (fourniture + clip vidéo + musique) créés selon le concept de « boire un verre dans un bar » que la modification de variables contextuelles telles que le clip vidéo diffusé modifiait le choix de boisson. Par exemple, lors de la diffusion d'un clip vidéo représentant un iceberg, les sujets ont plus souvent choisi une boisson chaude (café, thé ou chocolat) ou une bière blanche alors que lors de la diffusion d'un clip vidéo représentant un désert, les sujets ont plus souvent choisi des cocktails tels que la Margarita ou la Piña Colada, ou encore de la bière aromatisée à la Tequila.

2.2.3. Etat affectif

Enfin, l'état affectif peut également être entraîné par la présence d'un son plaisant ou déplaisant. Dans ce registre, Seo et al. (2009) ont montré que la valence hédonique de sons plaisants et déplaisants diffusés lors de la notation hédonique d'odeurs plaisantes et déplaisantes était transférée aux odeurs et cela, quelle que soit la valence de l'odeur. Seo & Hummel (2011) confirment cette observation en montrant que les odeurs ont été jugées plus agréables lors de l'écoute d'un son agréable par rapport à un son désagréable. Plus tôt, Gorn (1982) avait déjà avancé ce résultat en montrant qu'un son plaisant ou déplaisant lors de l'exposition à un produit (publicité) pouvait directement affecter les préférences entre produits. Cependant Kellaris & Cox (1989) n'avaient pas confirmé cette observation lors de la reprise de ces travaux. Enfin, on peut également citer Macht (1999) qui a montré que les sujets donnaient des notes supérieures aux mêmes aliments dans un contexte positif constitué d'épisodes joyeux ou Edwards et al. (2013) qui ont mis en évidence une augmentation de l'acceptabilité d'un repas lors d'émotions positives et à l'inverse, une diminution de l'acceptabilité lors d'émotions négatives. Aussi, lorsqu'il est demandé aux consommateurs d'indiquer les aliments qu'ils consommeraient s'ils se sentaient dans un état affectif positif, les résultats montrent que les consommateurs ont plus envie de consommer des aliments sains (Lyman, 1982).

Les conclusions principales des études passées en revue dans cette partie sont résumées dans le Tableau 6.

Tableau 6. Etudes portant sur l'influence du contexte émotionnel sur les préférences alimentaires

Catégorie	Références	Conclusions principales
Lieu/ Environnement social	Edwards et al. , 2013	Les émotions positives augmentent l'acceptabilité du repas tandis que les émotions négatives la diminuent En revanche, l'acceptabilité des repas n'est pas modulée par des variables telles que 'sexe', 'manger seul ou avec d'autres' ou encore 'âge'

Lieu/ Environnement social (suite)	King et al., 2004	L'appréciation diffère en fonction du contexte, mais de manière dépendante du produit (ici, salade, pizza et thé glacé) Contexte de repas : effet positif sur le thé Contexte social : effet négatif sur la pizza Contexte environnemental : Effet positif faible sur la pizza et le thé et effet négatif sur la salade
	King et al., 2007	Donner la possibilité de choisir au consommateur augmente l'acceptabilité tout comme le contexte de repas
	Edwards et al., 2003	Un même plat est préféré lorsqu'il est consommé au restaurant plutôt que dans des lieux institutionnels
	Meiselman et al., 2000	La préférence pour un même plat est fonction du lieu, restaurant > laboratoire > cafétéria
	Hersleth et al., 2003	La consommation d'une boisson (ici du vin) en salle de réception avec de la nourriture plutôt qu'en laboratoire et sans nourriture peut entraîner une augmentation de l'appréciation du produit
	Petit & Sieffermann, 2007	La notation hédonique d'un produit varie en fonction du lieu de consommation laboratoire (avec environnement modifié ou non) ≠ hors laboratoire
Ambiance	Oberfeld et al., 2009	Des lumières ambiantes peuvent moduler l'appréciation de produits (ici, du vin) Bleu et rouge > vert et blanc
	Sester et al., 2013	L'étude de choix de boissons par l'utilisation de bars immersifs (fourniture (bois ou plastique) + clip vidéo (bleu, désert, blanc et noir, iceberg ou rouge) + son (respectivement, ville, latino, électro, gouttes ou FarWest) a montré que la modification de variables contextuelles avait une influence sur le choix de boisson ; les boissons les plus choisies étaient différentes selon la combinaison clip + son. Exemples : Désert + latino : Margarita, Pinã Colada ou bière aromatisée à la tequila, Iceberg + gouttes : boisson chaude (café, thé ou chocolat) ou bière blanche
Etat affectif	Seo et al., 2009	La valence hédonique de sons peut être transférée à des odeurs quelle que soit la valence de l'odeur
	Gorn, 1982	Un son plaisant ou déplaisant lors de l'exposition à un produit peut directement affecter les préférences de produits
	Kellaris & Cox, 1989	(Reprise des travaux de Gorn G. J.) Pas de confirmation de la conclusion de GJ Gorn soit : la préférence du produit peut être conditionnée par une musique publicitaire
	Lyman, 1982	Dans un épisode émotionnel, préférence pour les aliments sains par rapport aux aliments "mauvais"
	Macht, 1999	Les caractéristiques liées à l'alimentation sont modulées par les émotions : La faim (ou motivation à manger) est plus forte lors d'un ressenti de colère ou de joie que lors d'un ressenti de peur ou de tristesse L'alimentation impulsive est plus forte lors d'un ressenti de colère par rapport à d'autres ressentis émotionnels L'appréciation est plus forte lors d'un ressenti de joie par rapport à d'autres ressentis émotionnels
	Seo & Hummel, 2011	L'appréciation d'odeurs peut être modulée par l'écoute de sons agréables ou désagréables, elles sont jugées plus agréables lors de l'écoute d'un son agréable par rapport à un son désagréable (pas d'effet sur l'intensité de la perception)

3. La mémoire au cœur de cette influence - l'émergence des connaissances dans le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002)

Le premier point de cette partie nous a permis de constater que nos sens interagissent continuellement. De ces interactions résulte une perception globale des stimulations, variant en fonction de différentes modalités. Mais alors comment les différentes modalités sensorielles que le consommateur est théoriquement capable de distinguer se combinent-elles lors du processus perceptif ? Le second point a ensuite permis de mettre en évidence de fortes influences contextuelles, mnésiques (familiarité, culture, congruence) ou émotionnelles (environnement social, lieu et ambiance, état affectif). Comment notre perception est-elle influencée par le contexte ?

La mémoire est au cœur de cette influence. C'est ce que nous allons tenter d'expliquer au travers du modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002) qui parmi les nombreux modèles sur la mémoire que l'on retrouve dans la littérature nous semble un des plus adaptés pour expliquer cette influence.

3.1. Les modèles de la mémoire

On distingue aujourd'hui, deux conceptions de l'architecture de la mémoire, la **conception « multi-systèmes »** et la **conception « unitaire »**. La première stipule que la mémoire peut être décomposée en un **ensemble de sous-systèmes fonctionnels** qui encodent, récupèrent et stockent les informations différemment. La seconde mentionne le traitement des informations selon un **processus unique**. **Les connaissances sémantiques sont considérées différemment selon la conception.** Dans le premier cas, on postule l'existence d'un sous-système mnésique spécialisé dans l'organisation et le traitement des connaissances sémantiques (opposées aux connaissances épisodiques). Dans le second cas, on postule le caractère strictement épisodique de toutes les informations contenues dans la mémoire ; la dimension sémantique des connaissances émergerait d'une part, de la multiplicité des traces antérieures réactivées par un événement et d'autre part, de l'intégration des multiples constituants des traces.

3.1.1. Les modèles multi-systèmes

Dans la théorie multi-systèmes, la mémoire est décomposable en un ensemble de sous-systèmes distincts dans lesquels les connaissances peuvent prendre différentes formes (procédurales, sémantiques, épisodiques, etc – cf Figure 1).

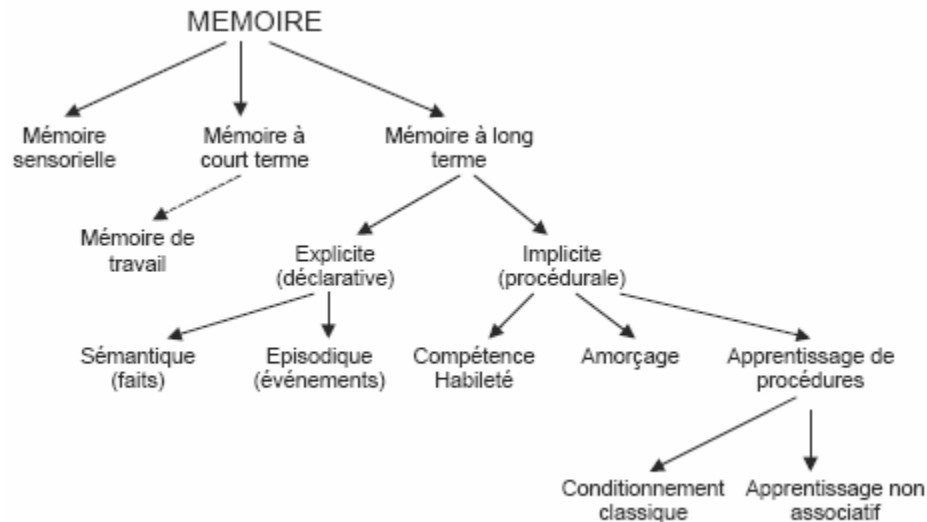


Figure 1. Synthèse de l'architecture de la mémoire (Badard, 2007)

On retrouve selon cette architecture, trois types de mémoires interactives :

- La mémoire sensorielle (MS) : La mémoire sensorielle est l'**étape initiale** du traitement de l'information à mémoriser, c'est une **interface** entre le flux intensif de stimuli externes qui nous parvient continuellement et les informations déjà stockées en mémoire.
- La mémoire à court terme (MCT) : La mémoire à court terme est souvent appelée *mémoire de travail*. Son rôle principal est de **retenir une information un court instant** (environ 30 secondes, mais peut aller jusqu'à quelques minutes), c'est à dire le temps d'effectuer une tâche impliquant cette information.
- La mémoire à long terme (MLT) : La mémoire à long terme contient les **savoirs et savoir-faire**, les **souvenirs personnels** autant que les **connaissances acquises** par l'éducation.

La MLT serait elle-même décomposable en deux sous-systèmes fonctionnels : la mémoire explicite qui constitue les diverses connaissances que l'on a apprises dans des livres et la mémoire implicite, mémoire relativement inconsciente, spontanée qui contient ce qui a trait aux activités physiques, que l'on améliore par l'expérimentation. Chacun de ces deux sous-systèmes serait encore décomposable en modules distincts. Notamment, deux modules constitueraient la mémoire explicite, l'un pour le stockage des connaissances sémantiques (savoir), l'autre pour les connaissances épisodiques (événements vécus par le sujet et inscrits dans un contexte spatio-temporel = mémoire du souvenir).

Ainsi, pour ce genre de modèles, les connaissances sémantiques sont considérées comme des **abstractions* amodales**. L'unité mnésique principale est une unité de sens autrement dit un **concept**.

Selon Versace & Nevers (2001), cette approche structurale multi-systèmes a plusieurs défauts. D'abord, elle n'est pas parcimonieuse : elle suppose l'existence pour chaque type de connaissance d'un

**abstraction : opération intellectuelle qui consiste à isoler par la pensée l'un des caractères de quelque chose et à le considérer indépendamment des autres caractères de l'objet*

système de mémoire particulier, autonome, avec des règles et des mécanismes spécifiques, notamment elle fait une distinction des connaissances épisodiques et sémantiques avec un caractère abstratif des connaissances sémantiques. Cette diversité des organisations proposées pour les différents systèmes rend aussi particulièrement difficile d'expliquer comment toutes les caractéristiques constitutives d'une expérience interagissent et s'intègrent pour former des connaissances cohérentes qui émergent de l'environnement. En outre, ces modèles multi-systèmes supposent l'existence indépendante d'un système de mémoire sémantique, permettant un accès conscient aux connaissances conceptuelles, et d'un système de mémoire épisodique, qui conserverait les expériences passées propres à l'individu, ses souvenirs. Comment alors rendre compte, à partir de ces deux systèmes indépendants, des liens entre les souvenirs, connaissances apparemment spécifiques à des expériences individuelles, et les connaissances conceptuelles ou abstractives, semble-t-il, détachées de ces expériences ? La mémoire épisodique n'est en effet pas une entité isolée de la mémoire sémantique, et notre expérience personnelle semble bien liée à l'élaboration des concepts et réciproquement : je sais par exemple que Johannesburg est une ville d'Afrique du Sud, parce j'y suis allé en vacances l'année dernière. Une connaissance épisodique semble pouvoir devenir sémantique par abstraction du contexte spatio-temporel dans lequel elle a été apprise. Mais il s'agit plus d'un changement d'état, c'est-à-dire d'un détachement progressif par rapport à des expériences personnelles, que d'un changement réel de système.

Les modèles à traces multiples ou systèmes uniques (e.g. Hintzman, 1986 ; Whittlesea, 1987 ; Logan, 1988) seraient alors une alternative, considérant :

- Un système unique
- Des traces épisodiques et multidimensionnelles reflétant les multiples dimensions des expériences de l'individu
- Des connaissances émergeant de l'activation des traces (activation fonction de la similarité entre expérience présente, au sens large, et les traces)

3.1.2. Les modèles à traces multiples ou système unique

Le passage des modèles multi-systèmes aux modèles système unique suppose un changement radical de perspective concernant non seulement l'organisation de la mémoire, mais aussi son contenu. Les connaissances ne sont plus ni des abstractions extraites de nos expériences et stockées en mémoire sémantique ou procédurale selon leur nature, ni des connaissances rattachées à un contexte spatio-temporel. Il s'agit dorénavant de traces laissées dans notre cerveau pour chacune de nos expériences. La réactivation de ces traces lors de nos interactions avec l'environnement ferait émerger souvenirs et connaissances, reconstitués chaque fois. Ces traces seraient multidimensionnelles et épisodiques. Une trace est multidimensionnelle car elle reflète les différentes dimensions de l'expérience notamment les dimensions sensorielles, motrices et émotionnelles. Elle est épisodique car elle reflète totalement l'épisode ou l'expérience dans laquelle elle s'est constituée, y compris l'existence même de cette expérience. Parmi ces modèles on retrouve le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002) que nous allons maintenant détailler.

3.2. Un modèle système unique : le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002)

3.2.1. Une mémoire unique stockant des traces épisodiques, multidimensionnelles et distribuées

Le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002) est un modèle épisodique de la mémoire postulant l'existence d'une mémoire unique stockant des traces épisodiques, multidimensionnelles et distribuées (Figure 2).

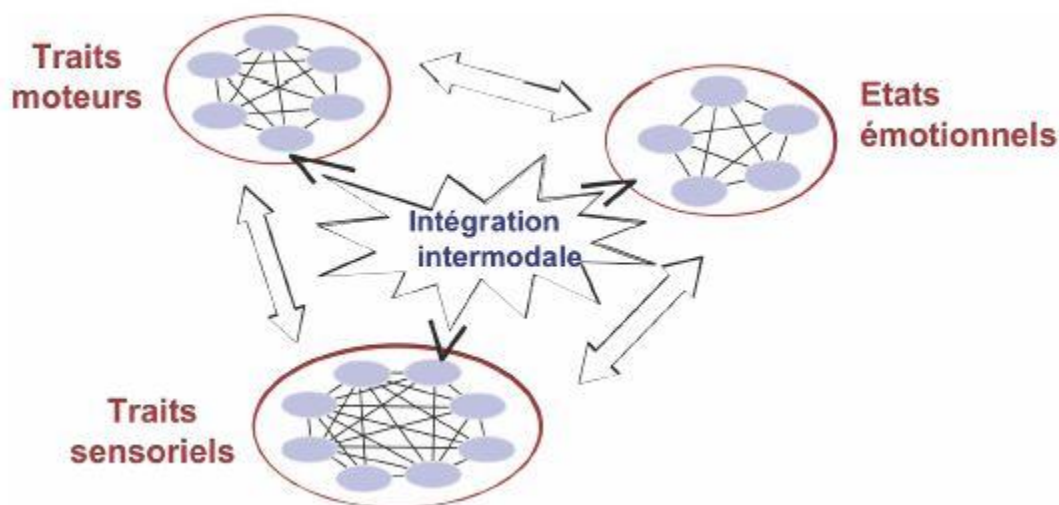


Figure 2. Ebauche d'architecture pour un modèle épisodique, multidimensionnel et distribué de la mémoire à long terme (Versace, Nevers et Padovan, 2002)

Des traces distribuées

Les traces mnésiques stockées dans cette mémoire ne sont pas localisées, ni indépendantes les unes des autres, mais distribuées sur un ensemble de composants, ou modules. L'ensemble du cerveau serait mis en jeu dans la constitution des connaissances, le stockage et la récupération.

Des traces multidimensionnelles

Chacun des modules sur lesquels les traces mnésiques seraient distribuées code de manière distribuée les différentes composantes ou dimensions, associées à chaque trace. Ces dimensions sont essentiellement sensorielles, motrices et émotionnelles. Ainsi, dans chacune des traces seraient codés les aspects sensoriels, moteurs et émotionnels. On peut imaginer que pour la connaissance « pomme » seraient stockées en mémoire toutes les dimensions sensorielles relatives à cet objet, sa couleur, sa forme, sa texture, son goût mais aussi les aspects moteurs comme la façon de la prendre et même de la manger et enfin, les aspects émotionnels relatifs au plaisir (ou déplaisir) liés à cet aliment. Aussi, face à un stimulus visuel, la photo d'une pomme par exemple, toutes les dimensions sensorielles, motrices et émotionnelles associées à cet objet vont être activées et notamment son odeur, son goût, ces activations étant les mêmes qu'en présence de l'objet lui-même. Ces dimensions stockées (sensorielles, motrices et émotionnelles) sont le reflet des expériences vécues et sont distribuées sur de multiples systèmes

neuronaux prenant en charge notamment les traitements sensori-moteurs et émotionnels. Aussi, la troisième caractéristique de ces traces mnésiques est d'être épisodique.

Des traces épisodiques

Les traits codés au niveau de chacune des dimensions ne sont pas des invariants mais dépendent de nos expériences passées. Chacune des traces reflète en effet le contenu de nos expériences passées.

3.2.2. Des traces principalement sensori-motrices

Dans la perspective abstractionniste de la mémoire, les connaissances sont généralement amodales (discernables par plus d'un sens). Issues de représentations perceptives, elles sont ensuite supposées s'en détacher par un mécanisme de transduction (Pylyshyn, 1984). Cependant, la relation entre les connaissances amodales et les représentations perceptives qu'elles symbolisent est totalement arbitraire. Notamment, Barsalou (1999) cite un nombre de problèmes inhérents à l'hypothèse de représentations amodales que Versace, Nevers & Padovan (2002) rapportent : (1) **aucune description valable du mécanisme de transduction** et de son inverse n'a jusqu'à présent été fournie, (2) **aucun argument neurologique** ne peut être trouvé en faveur de l'existence de ces mécanismes ; (3) si les deux formes de représentation existent, alors les **représentations symboliques amodales sont redondantes** ; (4) enfin, il n'existe **aucune preuve de l'existence des représentations amodales**, bien au contraire, la plupart des travaux montrent que les représentations conceptuelles ont toujours un caractère perceptif. Ainsi, de nombreux auteurs (Barsalou, 1993 ; 1999 ; Barsalou, Hutterlocher & Lamberts, 1998 ; Barsalou, Solomon & Wu, 1999 ; Glenberg, 1997 ; Mandler, 1992 ; Pulvermüller, 1999 ; Solomon & Barsalou, 2001) défendent l'idée de représentation non pas amodales, mais essentiellement sensori-motrices.

Aussi, de nombreux travaux, qu'ils soient issus de la psychologie, des neurosciences cognitives ou de la neurophysiologie, vont dans le sens que les connaissances sont multimodales. Les **données comportementales** (issues de la psychologie cognitive) ont notamment montré que les résultats obtenus dans des tâches telles que la vérification de propriétés ne peuvent s'expliquer par une vision amodale des connaissances. On peut citer par exemple une étude de Tucker & Ellis (1998) dans laquelle les participants étaient invités à juger si des objets étaient à l'endroit ou à l'envers. Les résultats révèlent des temps de réponse plus courts lorsque la main pour répondre correspond à celle impliquée par l'orientation (gauche ou droite) de l'objet. Il semble ainsi que le participant, par la simple observation de l'objet, ait activé des composantes motrices qui facilitent la réponse lorsque le geste impliqué par la réponse est congruent avec les activations motrices. Les **données issues des neurosciences et de la neurophysiologie** ont montré que les connaissances conceptuelles et la perception sont sous-tendues par les mêmes mécanismes neuronaux. En effet, de nombreux travaux mettent en évidence une activation automatique, face à un stimulus tel un mot désignant un objet, des aires sensorielles et motrices associées à la perception et la préhension de cet objet, sans que la tâche demandée au sujet ne le nécessite.

3.2.3. Des connaissances émergentes

Mécanisme d'activation des connaissances sensori-motrices

L'activation est décrite comme un mécanisme interactif et multimodal et s'apparente à un processus d'appariement (*i.e.* calcul de similarité). En d'autres termes, lors du traitement d'un indice, le système non seulement active de manière précoce les composants des traces (*i.e.* dimension sensorielle) partageant les mêmes caractéristiques que l'indice mais est aussi capable d'activer les autres composants des traces initialement activées.

Dans le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002) une trace correspond à une synchronisation d'activations au sein de différentes dimensions qui la constituent, ou du moins à l'impact à long terme de cet état d'activation. Ce sont les interactions entre l'individu et son environnement qui entraîneraient l'émergence des connaissances qui n'auraient pas d'existence réelle en mémoire. Autrement dit, **les connaissances n'ont pas d'existence indépendamment des situations dans lesquelles elles sont impliquées et sont toujours créées ou recrées.**

Mécanisme d'intégration

L'intégration est décrite comme un mécanisme intervenant à proprement parler dans l'émergence des connaissances, dans le sens où il permet l'accès à des connaissances de plus en plus élaborées. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, lors de la confrontation avec l'environnement, des activations en parallèle dans de nombreuses structures codant les dimensions sensorielles des objets s'observeraient. Ces premières activations se propageraient ensuite en cascade, vers d'autres composants en rapport avec les autres propriétés de l'environnement (dont les composants moteurs et affectifs). Ces activations précoces, spécifiques aux propriétés élémentaires des objets, seraient suivies par des intégrations de plus en plus poussées, intra et inter-modales, qui permettraient un accès à des connaissances de plus en plus élaborées et unitaires en rapport avec l'environnement présent. **Les connaissances sont alors issues non seulement des propriétés objectives des situations, mais aussi du sujet lui-même** (de ses expériences antérieures, de son état affectif, des objectifs qu'il s'est fixé, et donc des actions qu'il entreprend pour atteindre ces objectifs).

3.3. Des dimensions émotionnelles

Ainsi, il semble bien qu'une trace mnésique conserve à la fois les aspects sensoriels des informations traitées et les aspects moteurs des traitements effectués sur ces informations. Toutefois, définir les traces uniquement par leurs composantes sensori-motrices n'est pas suffisant. Une autre composante, très souvent négligée, est certainement codée au sein des traces : l'émotion. Chaque expérience est en effet toujours associée à des états du corps plus ou moins agréables et désagréables, et le système mnésique doit en garder une trace. Notamment, il y a 20 ans, Damasio (1994) proposait que l'émotion puisse jouer un rôle important dans le comportement cognitif. Pour lui, la prise de décision est dirigée par un ensemble de marqueurs somatiques qui correspondent à des propriétés émotionnelles affectées à un stimulus lors de l'interaction avec celui-ci.

Mais qu'est-ce qu'une émotion ? La psychologie des émotions est une discipline large et controversée car les auteurs ne s'accordent pas sur le « fonctionnement » de celles-ci (Sander & Scherer, 2009). Différents modèles ou théories ont été développés pour tenter d'expliquer les phénomènes liés aux émotions, comme les réactions corporelles (ex : tremblement, palpitation et fuite devant un ours (peur)).

3.3.1. Qu'est qu'une émotion ?

Emotion, humeur et affect

Le terme émotion est souvent utilisé pour qualifier un état mental se manifestant par des modifications physiologiques, comportementales, cognitives, motivationnelles et subjectives (Luminet, 2002). Selon Ekman & Davidson (1994), l'émotion est une réaction précise et brève, provoquée par un stimulus déterminé. L'émotion correspond à un ressenti de courte durée, mais de forte intensité, ayant une cause précise et facilement identifiable (joie, tristesse, colère, peur, dégoût). A l'origine d'une émotion peut se trouver un individu, un contexte ou encore un objet vers lequel les émotions sont régulièrement dirigées (Corson, 2002 ; Isen, 1984). L'humeur, elle, est définie généralement comme l'ensemble des dispositions, des tendances dominantes qui forment le tempérament, le caractère. Enfin, l'affect est généralement défini comme l'ensemble des manifestations subjectives accompagnant les sensations, les sentiments, les émotions et certaines pensées (Fartoukh, 2013).

L'émotion se distingue de l'humeur ou de l'affect, car (1) elle est **orientée** vers un événement ou un stimulus spécifique (perçu, imaginé, remémoré), (2) elle a un **fort impact sur les comportements** en raison de la préparation de la mise en action, (3) elle **active la plupart des sous-systèmes** de l'organisme, qu'elle peut, dans une certaine mesure, synchroniser, (4) elle **prend le contrôle prioritairement sur les autres processus** en cours, les surpassant. C'est un ensemble de variations d'une **durée d'activation** relativement **courte**, mais d'une **intensité** bien plus **importante** que l'humeur par exemple.

L'approche discrète

L'approche discrète des émotions (ou théorie des émotions de base) stipule que les émotions sont impliquées dans des processus d'adaptation des individus à l'environnement, via le caractère hautement informatif des émotions de base. Elles permettent d'organiser les réponses des individus face aux événements importants auxquels ils sont confrontés et les aident ainsi à s'adapter pour leur survie. L'une des composantes essentielles de l'émotion est donc la tendance à l'action (Sander & Scherer, 2009). Les auteurs qui se placent dans ce cadre théorique stipulent qu'il existe un nombre limité d'émotions de base (Ekman, 1992a, 1992b; Izard, 1992) et que les émotions plus complexes seraient issues d'une combinaison de ces émotions de base. Globalement, les auteurs s'accordent pour inclure la colère, la peur, la joie, la tristesse, le dégoût et la surprise parmi les émotions de base. Il est généralement admis que ces émotions de base sont directement reliées à une action, étant donné qu'elles ont pour but la survie de l'individu. Néanmoins certains auteurs tels qu'Ortony & Turner (1990) ont remis en cause la validité d'un tel modèle. De manière similaire, selon Feldman Barrett (1998), une vision statique telle que l'approche discrète des émotions ne permet pas de décrire précisément les différents états émotionnels.

Les modèles dimensionnels

Les **modèles dimensionnels** supposent que les émotions se répartissent sur un continuum. Il s'agit ainsi de modèles dynamiques (Feldman Barrett, 2006). Il existe différents modèles dimensionnels.

- Les modèles tri-dimensionnels de Wundt et Osgood

Wundt (1896) a proposé l'existence de trois dimensions qui sous-tendent les expériences émotionnelles. La fusion de ces trois dimensions correspond à l'expérience émotionnelle. Ces trois dimensions sont l'aspect plaisir (*pleasure*), l'aspect excitation/alerte (*arousal*) et l'aspect dominance (*dominance*). Toutes les émotions ressenties par les humains pourraient être décrites à l'aide de ces trois dimensions. Le modèle Pleasure-Arousal-Dominance (PAD) développé par Russell & Mehrabian (1977) correspond à ces trois dimensions. Plus tard Osgood (1962) proposa, sur la base d'analyses sémantiques, un modèle proche en affirmant l'existence de trois dimensions fondamentales pour la description des affects : l'évaluation (négatif, positif), la puissance (faible, forte) et l'activation (faible, forte). Ce modèle est parfois appelé le modèle EPA (Evaluation, Potency, and Activity)

- Le modèle bi-dimensionnel ou modèle circumplexe de Russell

Le modèle circumplexe (*circumplex*) de Russell (1980) reprend l'idée de Wundt et propose un modèle simplifié en représentant les émotions comme étant distribuées sur un cercle avec pour dimension horizontale le plaisir (*pleasure*) et verticale l'état d'excitation (*arousal*) (Figure 3).

- Le modèle uni-dimensionnel de Duffy

Enfin, un peu plus tôt, Duffy (1941) affirma que l'émotion se réduirait principalement à la notion de «niveau d'énergie» (faible, fort).

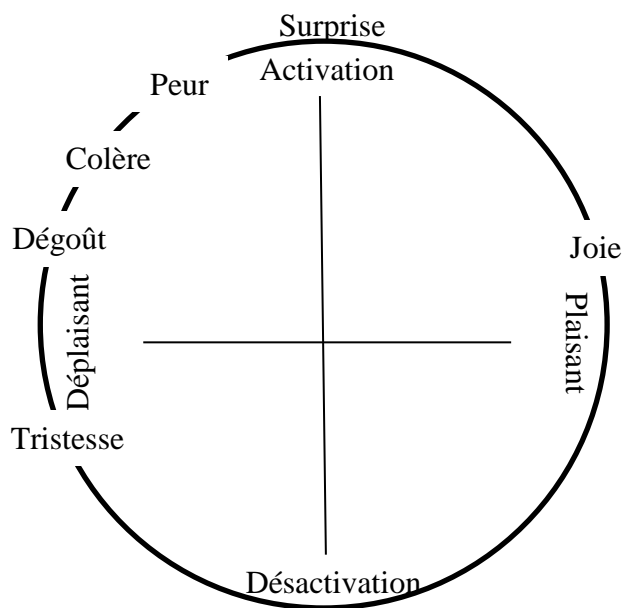


Figure 3. Représentation du modèle du circumplexe de Russell, avec la dimension horizontale de valence et la dimension verticale d'activation.

Les théories cognitives de l'émotion

L'objectif des théories cognitives est de montrer que l'évaluation émotionnelle dépend du contexte. Pour certains auteurs (Arnold, 1960 ; Leventhal, 1980 ; Leventhal et Sherer, 1987 ; Scherer, 1984, Frijda, 1986 ; Lazarus, 1991) la cognition est une condition indispensable pour le vécu d'une expérience émotionnelle. Ils expliquent que les émotions ont une fonction essentielle dans l'organisation des comportements. Elles préparent à l'action et poussent les individus à répondre de façon adéquate à la situation à laquelle ils sont confrontés. Pour cela, un traitement cognitif de type évaluatif à un haut niveau d'interprétation va déterminer le déclenchement de l'émotion (Sander, Grandjean, & Scherer, 2005). En d'autres termes, les modèles d'évaluation cognitive sous-tendent que c'est la façon dont le consommateur interprète une

situation qui va donner lieu à l'émotion et non la situation ou le stimulus lui-même (Siemer, Mauss, & Gross, 2007). La réponse émotionnelle fournie par l'organisme est ainsi hautement contextualisée dans le sens où elle intègre les caractéristiques individuelles et les propriétés de la situation environnementale. Pour leurs détracteurs, comme Zajonc (1980, 1984), les émotions ont leur propre autonomie et sont indépendantes de la cognition. En effet, pour cet auteur, la cognition ne peut être un processus automatique alors que les émotions en sont un. Il existe également les théories cognitivo-physiologiques. Par exemple, selon **Schachter et Singer** (1962), le processus émotionnel résulte de deux facteurs, une activation physiologique et une activité cognitive : la situation (stimulus) qui produit une activation physiologique indifférenciée, serait interprétée en fonction des expériences passées du sujet qui lui permettent de comprendre ses sentiments. Si le sujet possède une cognition explicative immédiate, il identifiera spontanément son état émotionnel ; sinon, il cherchera à interpréter son état interne en se comparant à autrui (besoin évaluatif et de comparaison sociale). En conclusion, une activation physiologique et une activation cognitive sont les deux composantes nécessaires, mais insuffisantes à l'occurrence d'un état émotionnel. Un individu ressentirait une émotion s'il y a aussi une relation causale entre ces deux éléments. Aussi, un même événement n'aura pas la même conséquence pour deux sujets et cela à cause des variables individuelles qui guident l'interprétation cognitivo-émotionnelle de la situation.

→ Ainsi, il n'existe pas une seule définition de l'émotion mais on peut retenir des différentes théories ou modèles que :

- une émotion est un **ensemble de variations** (modifications physiologiques, comportementales, cognitives, motivationnelles et subjectives) d'une **durée d'activation relativement courte**, mais de **forte intensité** ;
- les émotions sont impliquées dans des processus d'adaptation des individus à l'environnement, via le **caractère hautement informatif des émotions de base** (la colère, la peur, la joie, la tristesse, le dégoût et la surprise) ;
- les émotions se répartissent sur un **continuum unidimensionnel** («niveau d'énergie» (faible, fort)), **bidimensionnel** (le **plaisir** (pleasure) et l'**excitation** (arousal)) ou **tridimensionnel** (l'aspect **plaisir** (pleasure), l'aspect **excitation/alerte** (arousal) et l'aspect **dominance** (dominance) ;
- et enfin, les émotions ont une fonction essentielle dans l'organisation des comportements, elles **préparent à l'action** et poussent les individus à **répondre de façon adéquate à la situation** à laquelle ils sont confrontés via un **traitement cognitif** de type évaluatif à un haut niveau d'interprétation.

3.3.2. L'émergence des représentations émotionnelles

Nous avons précédemment rapporté l'idée de Versace, Nevers & Padovan (2002) de connaissances émergeant systématiquement d'un état du système nerveux, et résultant de l'interaction entre un individu et son environnement. Ces auteurs ont ainsi supposé que la confrontation avec l'environnement se traduit par des activations précoces, intervenant en parallèle dans de nombreuses structures codant les dimensions sensorielles. Appliqué à l'émotion, cela signifie que les premières activations sensorielles permettent l'émergence d'une première forme de représentation émotionnelle,

ou plutôt affective. Cette représentation affective correspondrait à des patrons neurophysiologiques induits très rapidement et automatiquement par tout stimulus.

Toujours selon les mêmes auteurs, les premières activations, spécifiques aux propriétés élémentaires des objets, seraient généralement suivies d'intégrations permettant d'accéder à des connaissances de plus en plus élaborées en rapport avec l'environnement présent. Ils précisent, que les représentations émotionnelles sont très certainement un exemple de ce type de connaissances. Elles correspondent à la valeur émotionnelle, ou signification émotionnelle, attribuée à un objet à l'issue de l'activation et de l'intégration de ses multiples composants, perceptivo-moteurs et affectifs.

De plus en plus de travaux en psychologie montrent que l'émotion intervient automatiquement et rapidement dans l'émergence de toute forme de connaissances. **L'émotion émergerait ainsi avant toute identification consciente de l'objet inducteur.**

3.3.3. Emotion et traces

L'émotion jouerait ainsi, selon Versace & Nevers (2001), un rôle essentiel au niveau de l'élaboration et de la réactivation des traces en mémoire en précisant que tout le monde a déjà eu l'occasion de constater que l'on se souvient beaucoup mieux d'une expérience passée si elle est associée à un état affectif intense. Mais quel est le rôle exact de l'émotion dans ce phénomène ? Il ne semble pas que le statut de l'émotion au sein de la trace soit équivalent à celui des autres composantes sensori-motrices. **Elle aurait une fonction essentielle au niveau de l'intégration des traces** (Versace et Rose, 2007). En effet, puisque la trace est multidimensionnelle, elle résulte d'une synchronisation d'activations au sein des différentes structures codant les multiples propriétés de l'expérience. Or, cette intégration des différentes dimensions de la trace nécessite l'intervention de structures neuronales spécifiques, qui sont aussi très souvent évoquées à propos de l'émotion (Ungerleider, 1995). C'est le cas notamment du cortex préfrontal et de l'amygdale. La région de l'hippocampe semble également être impliquée dans l'établissement et le stockage à long terme d'un lien entre les diverses caractéristiques sensorielles (Bechara et al., 1995).

3.4. Synthèse

Le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002) est donc un modèle épisodique de la mémoire postulant l'existence d'une mémoire unique. En résumé, les principales caractéristiques du système proposé sont les suivantes :

- Les **traces mnésiques** stockées dans cette mémoire ne sont pas localisées, ni indépendantes les unes des autres, mais **distribuées** sur un ensemble de composants ou modules
- **Chaque module code, également de manière distribuée**, les différents composants élémentaires, ou dimensions, des expériences associées à chaque trace
- Les dimensions sont essentiellement des dimensions sensorielles, motrices et émotionnelles
- Les traits codés au niveau de chacune des dimensions ne sont pas des invariants, mais **dépendent de nos expériences passées**

- Une **intégration** des dimensions est nécessaire pour la constitution de traces unifiées, bien qu'une trace plus élémentaire puisse également se constituer au niveau d'une seule dimension
- La trace d'une expérience est donc le résultat d'une **synchronisation d'activations** au sein des différents modules
- Une trace n'est pas une copie conforme d'une expérience mais plutôt une sorte de **schématisation ou d'abstraction de cette expérience**
- Les **connaissances**, quelles qu'elles soient, émergent des **états d'activation du système**
- Une connaissance du type **souvenir** correspond à un état d'activation très **proche d'un état antérieur spécifique**, alors qu'une connaissance catégorielle ou sémantique est issue de multiples traces antérieures
- L'émergence d'un état antérieur spécifique, ou la « récupération » d'un souvenir isolé, peut-être **facilitée par des marqueurs des traces**. L'**émotion** semble être un de ces marqueurs
- L'**émotion** peut également jouer un rôle primordial dans l'**intégration** des multiples composants élémentaires des objets au sein des traces.

4. Comment mesurer cette influence ? – Mesure de l'intensité de l'influent et mesure de l'influence

4.1. Méthodes subjectives

4.1.1. L'évaluation sensorielle

Un produit alimentaire peut être caractérisé par (Définitions AFNOR) :

- Son **odeur** : Propriété organoleptique perceptible par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles
- Sa **saveur** : Sensation perçue par l'organe gustatif (bourgeons du goût) lorsqu'il est stimulé par certaines substances solubles
- Sa **flaveur** : Ensemble complexe des sensations olfactives, gustatives et trigéminales (sensation irritante ou agressive dans la cavité buccale) perçues au cours de la dégustation
- Sa **texture** : Ensemble des propriétés mécaniques, géométriques, et de mécano-récepteurs, les récepteurs tactiles et éventuellement, par les récepteurs visuels et auditifs

On a vu que cette caractérisation par le sujet pouvait être influencée par une/des interaction(s) multimodale(s) ou plus rarement par le contexte. C'est également le cas de la préférence. L'évaluation sensorielle peut permettre de mesurer ces influences.

L'évaluation sensorielle est un ensemble de méthodes permettant **de mesurer les perceptions sensorielles** (vue, ouïe, odorat, goût, toucher) et **hédoniques** (j'aime-j'aime pas). Ainsi, elle permet de répondre à deux objectifs, (i) **caractériser/discriminer les produits de façon « objective »** (tests descriptifs et discriminatifs), (ii) déterminer des **préférences** (tests hédoniques). Elle peut ainsi permettre la mesure de l'influence autant sur la perception sensorielle des produits que sur les préférences.

Parmi ces méthodes on retrouve donc :

- Les **tests descriptifs** dont l'objectif est de mettre en évidence les ressemblances et différences entre produits sous forme, notamment, de cartes sensorielles
 - Profil sensoriel classique
 - Profil flash
 - Tri libre
 - DTS (Dominance Temporelle des Sensations)
 - PSP (Positionnement Sensoriel Polarisé)
- Les **tests discriminatifs** dont l'objectif est de déterminer si deux ou plusieurs produits sont ou non différents :
 - Test triangulaire
 - Test par paires
 - Test A-Non A
 - Test Duo-Trio
 - ...
- Les **tests hédoniques** (ou **tests consommateurs**) dont l'objectif est de mesurer l'appréciation des consommateurs pour ainsi évaluer la performance des produits.

Dans le cas de la mesure d'une influence, le test à utiliser sera choisi en fonction bien sûr de l'influence à tester. Si on souhaite tester l'influence sur les préférences, on choisira le test hédonique. En revanche, si on souhaite tester l'influence sur notre perception sensorielle du produit, on utilisera un test descriptif. Les tests discriminatifs ne seront en revanche pas adaptés. Qu'il s'agisse d'un test descriptif ou un test hédonique, dans les deux cas on utilisera des échelles, souvent des échelles d'intervalles structurées ou non allant de 0, note la plus faible, à 9 note la plus haute (Figure 4).

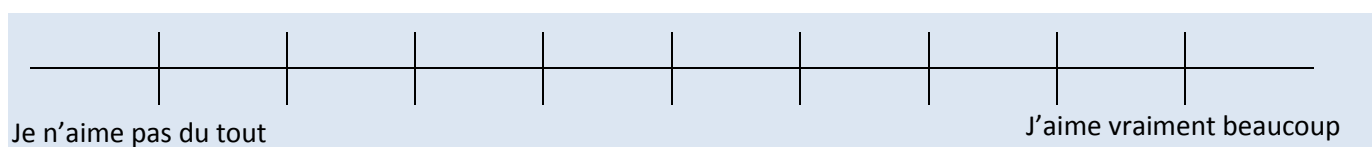


Figure 4. Exemple d'échelle hédonique d'intervalles structurée utilisée en analyse sensorielle

4.1.2. Les questionnaires d'émotions

Les émotions peuvent être évaluées via la composante cognitive qui renvoie, par définition, à l'évaluation que le sujet fait de son propre état émotionnel. Il existe donc des instruments d'auto-évaluation permettant au sujet d'exprimer ce qu'il ressent, et au chercheur d'appréhender ce ressenti. A ce propos, on peut distinguer les questionnaires ayant pour objectif de mesurer les émotions discrètes de ceux qui se proposent de mesurer les dimensions émotionnelles (Gil, 2009).

Les questionnaires ayant pour objectif de **mesurer les émotions discrètes** présentent au sujet des labels émotionnels, des adjectifs ou des phrases. Le sujet doit alors évaluer, à l'aide d'échelles, le degré avec lequel il ressent l'émotion proposée. On peut par exemple citer la Differential Emotions Scale

(DES) (Izard, 1977 ; Ouss et al., 1990 (traduction française)). Ce questionnaire est composé de 30 adjectifs correspondant à dix états émotionnels (colère, tristesse, peur...), chacun de ces adjectifs étant apprécié sur une échelle en 5 points. On retrouve également dans cette même catégorie la Brief Mood Inventory Scale (BMIS) (Mayer & Gaschke, 1988 ; Dalle & Niedenthal, 2001 (traduction française)) le sujet est invité à évaluer son ressenti pour 16 adjectifs émotionnels sur des échelles en 4 points. Cette dernière échelle permet d'obtenir, en fonction du calcul effectué, un score émotionnel discret (joie vs. tristesse), ou un score émotionnel dimensionnel (plaisant vs. déplaisant ; calme vs. excité ; etc.).

Les questionnaires qui se proposent de **mesurer les dimensions émotionnelles** sont fondés sur l'idée que toute émotion peut être appréhendée par trois dimensions, selon le modèle dimensionnel de Wundt (1897) (plaisir, activation et dominance). La dimension plaisir (ou valence) se définit sur un continuum déplaisir-plaisir (négatif-positif), et correspond au degré de satisfaction et de bien-être du sujet. La dimension activation se définit sur un continuum calme-excitation, et fait référence au degré d'éveil du sujet. Enfin, la dimension dominance se définit sur un continuum non contrôle-contrôle, et renvoie à la sensation du sujet de pouvoir influencer, contrôler la situation. Sur la base de ces trois dimensions, deux instruments de mesure sont communément utilisés. Le Pleasure-Arousal-Dominance (PAD) (Mehrabian & Russell, 1974) comprend 18 items, six pour chaque dimension, sous forme de phrases. Le sujet doit indiquer, sur une échelle en 7 points, avec quel degré son état correspond à chacune des propositions. Egalement, on retrouve la Self-Assessment Manikin scale (SAM) (Bradley & Lang, 1994), probablement la plus utilisée et qui contrairement aux précédentes n'est pas verbale mais sous forme graphique (Figure 5). Ainsi, pour chaque dimension, l'état d'une figurine est graphiquement décliné en 9 degrés (5 degrés et 4 intermédiaires). Par exemple, concernant la dimension plaisir, à une extrémité de l'échelle apparaissent un visage joyeux et à l'autre extrémité un visage renfrogné. La SAM est un outil extrêmement populaire car elle répond à trois principales limites des échelles verbales (manque de pertinence de certains items verbaux, problème de traduction, utilisation avec des enfants).

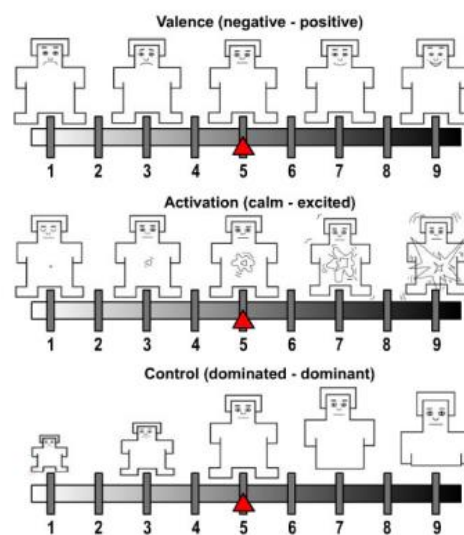


Figure 5. Self-Assessment Manikin scale (SAM) (Bradley & Lang, 1994)

<http://ywan4086.blogspot.fr/2010/04/sam-analysis.html>

Aussi, parce que les émotions peuvent avoir une influence sur le comportement du consommateur en termes de choix ou de préférences, la communauté sensorielle a récemment développé ses propres questionnaires, basés principalement sur la mesure des émotions discrètes, afin d'appréhender l'état émotionnel du sujet pouvant notamment être provoqué par un produit. On peut par exemple citer le questionnaire EsSenseTM de King, Meiselman & Carr (2010) qui se compose de 39 termes d'émotion; le questionnaire ScentMoveTM de Porcherot et al. (2010) composé de 6 dimensions comprenant 3 attributs, le « Geneva Emotion and Odour Scale » conçu pour les odeurs (Chrea et al., 2009) avec 36 termes, et le questionnaire présenté par Pineau et al. (Pineau et al., 2010) qui dispose de

36 termes. Comme on l'a vu plus haut, le sujet doit alors évaluer son état émotionnel à partir d'items d'émotion proposés. Cette évaluation peut être faite de deux manières, par la méthode CATA (Check All That Apply = Cocher tout ce qui s'applique) ou par la méthode de notation par échelle qui fournira des informations plus précises. Pour illustrer ceci, le tableau 7 rapporte la liste des attributs utilisés dans le profil EsSense™.

Tableau 7. Attributs utilisé dans le profil EsSense™ (King, Meiselman & Carr, 2010)

Active	Glad	Pleased
Adventurous	Good	Polite
Affectionate	Good-natured	Quiet
Aggressive	Guilty	Satisfied
Bored	Happy	Secure
Calm	Interested	Steady
Daring	Joyful	Tame
Disgusted	Loving	Tender
Eager	Merry	Understanding
Energetic	Mild	Warm
Enthusiastic	Nostalgic	Whole
Free	Peaceful	Wild
Friendly	Pleasant	Worried

Comme toute mesure reposant sur l'autoévaluation, les questionnaires que nous venons de présenter sont critiqués quant à leur capacité à refléter une image fidèle de l'état émotionnel du sujet. Effectivement, on peut soulever deux types de problème. Premièrement, on peut considérer que nous ne sommes pas tous égaux pour identifier et verbaliser nos émotions. Deuxièmement, le sujet peut céder à un biais d'attente. Autrement dit, le sujet peut agir intentionnellement sur ses réponses en reportant ce qu'il pense être bien de répondre.

4.2. Méthodes objectives

4.2.1. Mesures comportementales

Les personnes expriment leurs sentiments de diverses façons, par des expressions faciales, une posture, des gestes, la tonalité de la voix, etc. Les **expressions faciales** ont beaucoup été étudiées.

D'après Lopez (2006), l'expression faciale est un outil de communication très précis et rapide pour signaler une émotion. On peut détecter un sourire à plus de 30m,

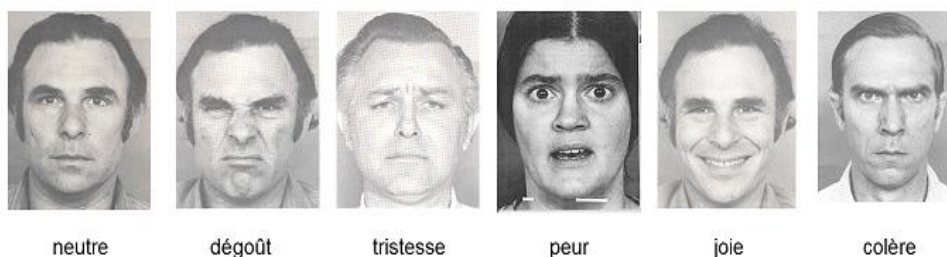


Figure 6. Principales expressions faciales

ou percevoir le haussement de sourcil de quelqu'un même si ce petit mouvement ne dure que 1/6 de

seconde. Mais cette grande expressivité du visage en fait aussi un outil idéal pour tromper, ce qui rend son analyse difficile. Cependant, il apparaît que les émotions réelles et les émotions feintes peuvent être distinguées anatomiquement et physiologiquement. Par exemple, un vrai sourire (sourire sincère) met en jeu les muscles de la bouche (zygomaticus major) et des yeux (obicularis oculi) alors qu'un sourire feint met en œuvre uniquement les muscles de la bouche (Ekman, Friesen & O'Sullivan, 1988). De plus, des expressions faciales « forcées » suscitent des réponses physiologiquement différentes de celles des expressions faciales « vraies ». La Figure 6 rapporte les principales expressions faciales.

Il existe deux principales méthodes de mesure des expressions faciales. Une première méthode consiste à coder la contraction des muscles faciaux sur la base d'Unités d'Actions (UA) standardisées. Le **Facial Action Coding System (FACS)** est le système de codage le plus répandu, car le plus élaboré. Il est composé de 46 UAs. Chaque UA peut correspondre à la contraction ou à la détente d'un ou plusieurs muscles, une expression faciale correspondant à la combinaison de plusieurs UAs (voir Figure 7). Des logiciels commencent à se développer afin de permettre d'utiliser cette méthode de manière automatisée (ex : The Observer® XT de Noldus). La seconde méthode est l'**électromyographie (EMG)** qui consiste à détecter les mouvements musculaires du visage à l'aide d'électrodes. Dans ce registre, on peut retrouver une série d'études menées par Dimberg (Dimberg, 1982 ; Dimberg, 1990 ; Dimberg & Lundqvist (1990) ; Dimberg & Thunberg, 1998 ; Dimberg, 1997 ; Dimberg & Karlsson, 1997 ; Dimberg et al., 2000 ; Dimberg & Pettersson, 2000 ; Dimberg et al., 2002) qui mentionnent principalement que les réactions faciales sont involontaires et fonction du type de stimuli émotionnels (réaction du zygomatic major (bouche) pour les stimuli positifs et du corrugator supercilii (sourcils) pour les stimuli négatifs) et plus prononcées chez les femmes que chez les hommes. D'autres auteurs comme Hess & Philippot (1998), Lundqvist (1995) ou Moody et al. (2007) ont rapporté des données similaires. Ces études sont résumées dans le Tableau 8.

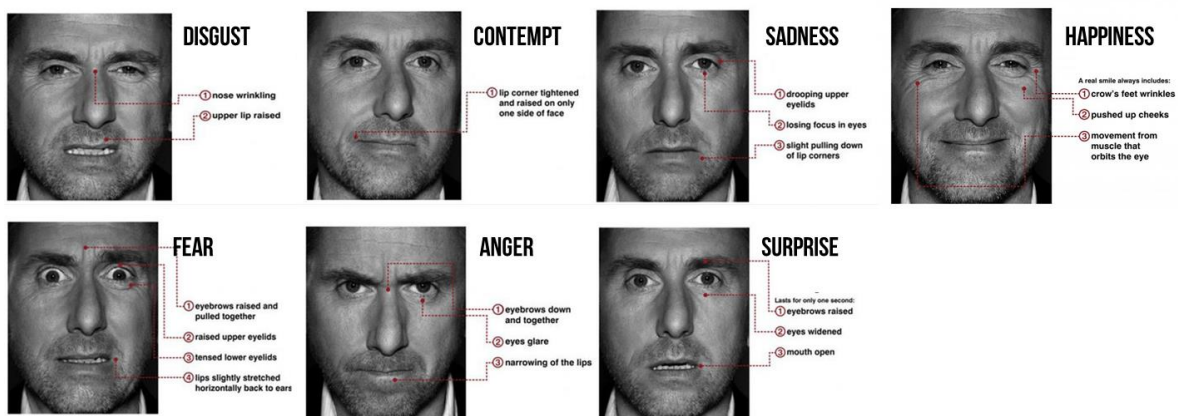


Figure 7. Codifications selon le FACS des 7 émotions universelles de Paul Ekman soit la joie, la peur, la colère, le dégoût, la surprise, le mépris et la tristesse

La **posture**, les **gestes** et la **tonalité de la voix** sont plus difficiles à interpréter. Cependant, dans une revue, Frick (1985) affirme que les émotions peuvent être exprimées à travers des caractéristiques prosodiques (l'inflexion, le ton, la tonalité, l'intonation, l'accent, la modulation données au langage oral). Par exemple il semblerait que l'activité ou l'excitation se traduisent par une augmentation de l'amplitude

et de la gamme de ton, du volume et de la vitesse de paroles ou encore que la colère est communiquée par de fortes hausses occasionnelles de ton et de volume. Concernant les gestes et la posture, Castellano et al. (2007) propose une méthode pour l'analyse des mouvements du corps traduisant des émotions (l'amplitude, la vitesse et la fluidité de mouvement).

4.2.2. Mesures physiologiques

De nombreuses manifestations physiologiques peuvent être considérées comme une preuve de la manifestation d'une émotion. On peut par exemple noter les variations des fréquences cardiaque et respiratoire, la dilatation de la pupille, l'augmentation de la réponse électrodermale, etc. Toutes ces manifestations ne seront pas détaillées dans cette partie, on se limitera aux plus utilisées, la fréquence cardiaque, la réponse électrodermale et la dilatation de la pupille au cœur de ce travail de thèse ; cette dernière sera en réalité décrite plus en détails dans le chapitre suivant.

Comme mentionné par Gil (2009), la **fréquence cardiaque** désigne les variations électriques issues de la contraction des muscles du cœur et à l'origine de la contraction des ventricules. Un électrocardiogramme (ECG) permet de rendre compte de ces variations. Les données expérimentales soulignent que cette activité fait apparaître trois phases lorsque l'on présente un stimulus émotionnel au sujet : une première décélération de l'activité, suivie d'une phase d'accélération, et terminée par une seconde phase de décélération. De plus, une émotion négative impliquerait une première décélération de l'activité cardiaque plus importante qu'une émotion positive, c'est en tout cas ce que montrent les résultats de Bradley et al. (2008) avec une décélération de la fréquence cardiaque significativement plus importante pour des stimuli négatifs par rapport à des stimuli positifs ou neutres. Il est donc possible d'appréhender l'état émotionnel du consommateur par l'utilisation de cette mesure. Et c'est d'ailleurs ce qu'affirment Appelhans & Luecken (2006) dans leur revue dans laquelle ils avancent une justification théorique et empirique de l'utilisation de la variabilité de la fréquence cardiaque comme une mesure objective des émotions.

La **réponse électrodermale** correspond à une activité électrique biologique enregistrée à la surface de la peau et reflétant l'activité des glandes de la sudation (glandes sudoripares). Ces glandes, particulièrement présentes sur la paume de la main mais également sur la voute plantaire et dans une moindre mesure au niveau du front, sécrètent la sueur et permettent ainsi le phénomène de transpiration. La réponse électrodermale peut être mesurée de deux manières différentes. La première consiste à positionner, sur deux doigts adjacents de la main, un capteur spécifique permettant de faire circuler un faible courant électrique non perçu par le sujet. On mesure ainsi les variations de conductance (ou résistance) provoquées par les changements de sudation. La deuxième consiste à mesurer simplement la différence de potentiel électrique entre deux zones cutanées, sans appliquer de courant électrique. Dans ce registre, Khalifa et al. (2002) ont noté une augmentation de la réponse électrodermale lors de l'écoute de musiques stimulantes (représentant la peur et la joie) par rapport à des musiques plus détendues (représentant la tristesse et la paix). Egalement, Bradley et al. (2008) ont montré une augmentation significativement plus importante de la réponse électrodermale pour des stimuli positifs et négatifs par rapport à des stimuli neutres. Ils ont d'ailleurs, dans cette même

expérience, montré une covariance entre la réponse électrodermale et la **dilatation pupillaire**, mesure qui sera détaillée plus loin.

Il existe aujourd'hui des outils flexibles qui permettent la réalisation de ces mesures au cours de n'importe quelle expérimentation de recherche. BIOPAC System Inc. peut par exemple être cité comme solutions sophistiquées pour l'acquisition et l'analyse des données (systèmes MP). Les mesures sont réalisées de manière non invasive grâce à différents capteurs (amplificateurs). Ce système peut également permettre de réaliser de l'électromyographie, précédemment citée.

Tableau 8. Etudes portant sur les réactions faciales (EMG)

*Les mesures EMG signalées par un * ont été réalisées sur les muscles suivants : corrugator supercilii (sourcils) et zygomatic major (bouche), pour les autres cela est précisé directement dans le tableau

Références	Description de l'étude	Brèves descriptions des résultats
Dimberg, 1982	Mesures EMG*, fréquence cardiaque et réponse électrodermale durant l'observation de visages en colère et heureux	Augmentation de l'activité de la région zygomatique pour les stimuli "heureux" et augmentation de l'activité de la région "sourcilière" pour les stimuli "en colère" Diminution du risque cardiaque et augmentation de la réponse électrodermale (amplitudes similaires) pour les deux types de stimuli Conclusion : L'EMG permet la distinction des réponses à des stimuli visuels et émotionnels "négatifs" et "positifs"
Dimberg, 1990	Revue	Les résultats de plusieurs études ont montré que les réactions faciales (1) sont spontanément provoquées et fonction du type de stimuli émotionnels, (2) sensibles à l'apprentissage, (3) cohérentes avec la perception des sujets et leurs propres émotions, (4) en harmonie avec les réponses autonomes (système sympathique) (5) plus prononcées chez les femmes que chez les hommes et (6) différentes entre les sujets avec des craintes spécifiques. Conclusion : L'EMG est un outil sensible pour mesurer les réactions émotionnelles
Dimberg & Lundqvist, 1990	Mesures EMG* durant l'observation par des hommes et des femmes de visages d'hommes ou de femmes en colère et heureux	Réaction "frontale" entraînée par les stimuli négatifs, et réaction du muscle zygomatique entraînée par les stimuli positifs plus élevées chez les femmes (surtout pour stimuli positifs) que chez les hommes mais identiques quel que soit le genre du stimulus Les stimuli étaient perçus de la même manière par les hommes et les femmes Conclusion : Résultats cohérents avec les résultats antérieurs indiquant que les femmes sont plus réactives au niveau des expressions faciales que les hommes
Dimberg & Thunberg, 1998	Mesures EMG* durant l'observation de visages en colère et heureux	Réaction "frontale" entraînée par les stimuli négatifs, et réaction du muscle zygomatique entraînée par les stimuli positifs détectables après seulement 300 à 400 ms d'exposition Conclusion : Les réactions faciales sont rapidement provoquées
Dimberg, 1997	Mesures EMG* durant l'observation d'images positives ou négatives	Les stimuli positifs ont provoqué une augmentation importante de l'activité du zygomatique dans les 500 premières ms d'exposition La réponse musculaire du corrugator supercilii était plus importante pour les stimuli négatifs après 500 ms de l'exposition. Ces différentes réactions ont été particulièrement marquées en réponse à des stimuli "biologiquement pertinents" (ex: visages heureux/en colère, images de serpents) Conclusion : Les stimuli émotionnels peuvent être traités rapidement et la réponse émotionnelle peut se manifester rapidement

Dimberg et al., 1997	Mesures EMG* durant l'observation de visages exprimant la colère ou la joie et d'images de serpents	Les visages en colère et les serpents ont entraîné une réaction du corrugator, tandis que les visages heureux ont entraîné une réaction du zygomatic
Dimberg et al., 2000	Mesures EMG* lors de l'observation inconsciente (technique de l'arrière-masquage (backward-masking)) de visages exprimant la colère ou la joie avec entre deux visages expressifs, un visage neutre	Malgré le fait que l'exposition à des visages heureux et en colère était inconsciente, les sujets ont réagi avec des muscles faciaux distincts correspondant selon la littérature aux réactions aux stimuli de visages expressifs positifs et négatifs Conclusion : Les réactions émotionnelles positives et négatives peuvent être inconsciemment provoquées, autrement dit, la communication émotionnelle face-à-face peut se produire à un niveau inconscient
Dimberg & Petterson, 2000	Mesures EMG* durant l'observation de visages en colère et heureux	Les réactions (réaction zygomatic pour la joie, réaction corrugator pour la colère) ont été significativement plus importantes sur le côté gauche de la face Conclusion : Ces résultats soutiennent l'hypothèse que l'hémisphère droit du cerveau est principalement impliqué dans le contrôle des réactions émotionnelles spontanées.
Dimberg et al., 2002	Mesures EMG durant l'observation d'images positives ou négatives Instructions : Ne pas réagir avec leurs muscles faciaux ou réagir aussi rapidement que possible en fronçant les sourcils ou en souriant	Réaction "frontale" entraînée par les stimuli négatifs, et réaction du muscle zygomatic entraînée par les stimuli positifs observées quelles que soient les instructions Conclusion : Les sujets n'ont pas pu éviter de produire une réaction faciale malgré la consigne de ne pas réagir avec leurs muscles faciaux
Hess et al., 1998	Variations du type de tâche, de la présentation des stimuli, et de la difficulté de la tâche pour tester 3 hypothèses : les réactions du visage à des expressions faciales émotionnelles sont 1) un mimétisme (empathie affective) (2) dues à une affectation - induction de l'émotion (3) déterminées par la charge cognitive en fonction de la difficulté des tâches	Les résultats montrent que les expressions faciales peuvent être soit affectives ou cognitives, la preuve de mimique faciale n'a été trouvée que lorsque les individus ont porté des jugements concernant la valence émotionnelle de l'expression faciale Les autres types de jugements ne semblent pas susciter de mimétisme mais peuvent conduire à des réactions faciales liées à la charge cognitive
Lundqvitz, 1995	Mesures EMG (corrugator supercilii (sourcils), zygomatic major (bouche), lateral frontalis (front), depressor supercilii (sourcils) et levator labii (lèvres)) durant l'observation de visages exprimant la tristesse, la colère, la peur, la surprise, le dégoût et la joie	Les sujets ont reproduit l'activité EMG du visage observée confirmant l'hypothèse que les expressions du visage sont contagieuses (Plus importante chez les femmes)
Moody et al., 2007	Mesures EMG* durant l'observation de visages neutres ou exprimant la colère ou la peur dans 2 conditions (induction de peur, neutre)	L'induction de peur a augmenté les réactions expressives de peur face aux visages en colère mais n'a pas eu d'effet lors de l'observation de visages neutres Conclusion : Les réactions faciales ne sont pas que mimétiques; l'émotion influence ces réponses

4.2.3. Mesures neurologiques

Moins fréquentes car plus difficiles à interpréter et plus onéreuses, les mesures neurologiques peuvent également permettre de mesurer l'état émotionnel du sujet.



Figure 8. EEG

La mesure la plus fréquemment utilisée en psychologie est l'**électroencéphalographie** (EEG) qui permet de capturer l'activité électrique du cerveau. Des potentiels évoqués (ERP, Event-Related Potential), modifications du potentiel électrique produites par le système nerveux en réponse à une stimulation externe, notamment sensorielle (un son, une image, etc.) mais aussi à un événement interne, notamment une activité cognitive (attention, préparation motrice, etc.) sont enregistrés pour être interprétés. Pour cela des électrodes sont positionnées sur le cuir chevelu (Figure 8). La différenciation des émotions de base au moyen de spectres d'EEG a été largement discutée par Machleidt et al. (1989). Aussi, il semblerait que certains potentiels évoqués (par exemple, N300) soient révélateurs de l'activité électrique du cerveau provoquée par le traitement d'un stimulus émotionnel (Carretié et al., 1997). Des systèmes d'EEG simplifiés (moins d'électrodes et moins fiables) apparaissent aujourd'hui sur le marché à des prix très attractifs afin de faciliter l'accès à ce type de mesure (ex : le casque Emotiv de Emotiv Systems – Figure 9).



Figure 9. Casque Emotiv

Dans les mesures neurologiques, on retrouve également l'**Imagerie à Résonance Magnétique fonctionnelle** (IRMf) qui mesure la consommation d'oxygène dans les tissus du cerveau en fonction des actions du sujet. Elle permet de distinguer les zones du cerveau susceptibles d'être sollicitées. Pour citer un exemple, dans le domaine alimentaire, le recours à l'IRMf a permis de mettre en évidence un substrat commun pour les « fringales » alimentaires et l'état de manque (drogues). En effet, on a mesuré, chez des sujets affamés, des modifications de signaux liées à la faim dans l'hippocampe, l'insula, et le noyau caudé, trois régions connues pour être impliquées dans l'état de manque (drogues) (Pelchat et al., 2004).

Enfin, on retrouve également la **magnétoencéphalographie** (MEG), technique de mesure des champs magnétiques induits par l'activité électrique des neurones du cerveau. À la différence de l'IRM fonctionnelle, la MEG mesure l'activité magnétique du cerveau en temps réel. Ainsi, les chercheurs l'utilisent afin d'accéder notamment à la résolution temporelle des fonctions cognitives.

CHAPITRE 2 : LA PUPILLOMÉTRIE COMME MESURE OBJECTIVE

1. La pupille

Cette synthèse sur la pupille est partiellement inspirée d'une synthèse proposée par Talbot (1995).

1.1. Anatomie

1.1.1. La pupille

La pupille est l'orifice limité par l'iris par lequel les rayons lumineux pénètrent dans le globe oculaire. Elle peut être considérée à la fois comme le reflet de l'oculomotricité et de la fonction rétinienne. Son but ultime est d'offrir à la rétine des conditions optimales de fonctionnement (Rougier & Riss, 2000). Elle est ordinairement circulaire, située au centre de l'iris (Figure 10). Le diamètre moyen de la pupille est de 3 à 4 mm. Sa taille peut varier entre 7.5 mm et 8 mm en pleine mydriase (dilatation) et entre 1.7 et 2.2 mm en plein myosis (contraction) (Larmande & Larmande, 1989). On considère comme anormales les pupilles dont le diamètre est inférieur à 2 mm (myosis) ou supérieur à 6 mm (mydriase) et les pupilles nettement inégales (anisocorie) (Ropert & Lapresle, 1990). La motricité pupillaire est assurée par deux muscles antagonistes : le dilatateur et le sphincter de l'iris, l'action du sphincter étant prépondérante (Adams & Victor, 1985). La pupille est peu dilatée chez le nouveau-né, le dilatateur étant peu développé à cet âge. La taille est maximale chez l'adolescent puis diminue progressivement avec l'âge. Elle est en générale plus large chez la femme, le myope et les sujets à iris clair (Rougier & Riss, 2000).

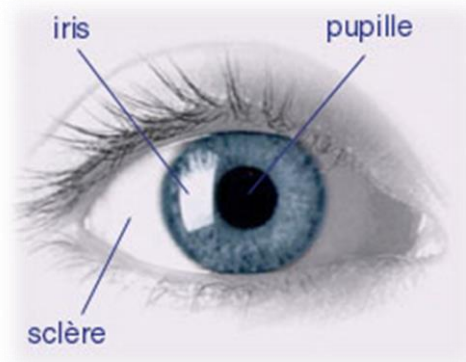


Figure 10. Parties visibles de l'oeil

<http://www.eurolasik.com>

1.1.2. La musculature irienne

L'iris est un diaphragme disciforme, perforé par un orifice central, la pupille. La fonction principale de l'iris est de réguler la quantité de lumière atteignant la rétine par l'ajustement du diamètre pupillaire. Cet ajustement est assuré par un double système musculaire : un système circulaire, le sphincter de la pupille, et un système radiaire, le dilatateur de la pupille (Rougier & Riss, 2000) (Figure 11). Le **sphincter de l'iris** est un muscle plat dont les fibres se disposent concentriquement, juste au pourtour de la pupille, assurant ainsi sa contraction (Smadja, Mas & de Recondo, 1988). Le **muscle dilatateur de l'iris** est une lame musculaire très mince, circulaire, à

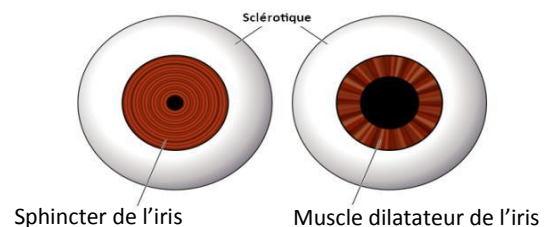


Figure 11. Double système musculaire de l'œil

fibres radiaires, s'étendant sur toute la surface de l'iris, de sa base au bord de la pupille, plus postérieur que le sphincter (Renard, Lemasson & Saraux, 1965 ; Saraux, Biais & Rossaza, 1988 ; Smadja, Mas & de Recondo, 1988). Le couple de muscles sphincter-dilatateur de la pupille obéit à la loi d'innervation réciproque de Sherrington, l'excitation de l'un s'accompagnant d'une inhibition de l'autre (Ropert & Lapresle, 1990). L'innervation des muscles iriens est assurée par l'intermédiaire des nerfs ciliaires, par le système nerveux autonome : parasympathique pour le sphincter circulaire pupillo-constricteur, sympathique pour le muscle radiaire pupillo-dilatateur (Ropert & Lapresle, 1990). Le système sympathique assure un tonus permanent sur le muscle dilatateur, le maintenant dans un état de contraction partielle ; les fibres parasympathiques exercent elles aussi une action tonique sur le sphincter de l'iris (Smadja, Mas & de Recondo, 1988).

1.1.3. Organisation générale du système nerveux autonome

Le système nerveux autonome (ou végétatif) est la partie du système nerveux responsable des fonctions automatiques, non soumise au contrôle volontaire. Par opposition au système nerveux central et au système nerveux périphérique, il est composé de deux parties : le système nerveux sympathique (ou orthosympathique) et le système nerveux parasympathique. Ces deux systèmes sont présentés synthétiquement dans le Tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9. Caractéristiques du système nerveux sympathique et du système nerveux parasympathique

SYSTEME NERVEUX SYMPATHIQUE	SYSTEME NERVEUX PARASYMPATHIQUE
Contrôle les activités involontaires de l'organisme en situation de stress et d'éveil. Prépare l'organisme à l'activité physique ou intellectuelle, et orchestre les réponses de fuite ou de lutte. Agit en situations dites d'alerte.	Contrôle les activités involontaires de l'organisme en situation de paix et de repos . Est en charge de la conservation et de la restauration de l'énergie de l'organisme après une réponse sympathique au stress.
Exerce ses effets par des neurotransmetteurs appelés noradrénaline (NA) (et dans une moindre mesure l'adrénaline), et parfois l'acétylcholine (Ach).	Exerce ses effets via l'acétylcholine.
Fonctionne sur un modèle à 2 neurones : - neurone préganglionnaire avec corps cellulaire dans la moelle épinière - neurone post ganglionnaire (corps cellulaire dans le ganglion) innervant le tissu cible	- Neurones avec corps cellulaire au niveau du tronc cérébral ou de la moelle sacrée. Les ganglions parasympathiques étant près de l'organe cible, le premier neurone est en général long et le second très court.

Les centres régulateurs du système nerveux végétatif sont situés dans la moelle épinière, le cerveau et le tronc cérébral (zone localisée entre le cerveau et la moelle épinière) (Figure 12). Le système nerveux autonome oculaire exerce un rôle régulateur sur le diamètre pupillaire et sur le cristallin (pour le parasympathique uniquement), une action sécrétoire sur les glandes lacrymales et plus accessoirement une action vasomotrice et trophique (Smadja, Mas et de Recondo, 1988).

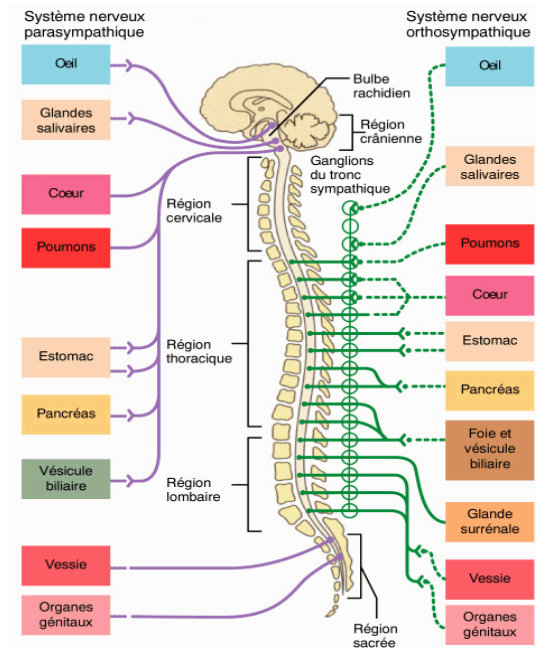


Figure 12. Système nerveux autonome

http://flosflorum.fr/NeuroSciences/PagesCours/syst_nerveux.htm

1.1.4. Innervation de l'iris

L'iris est innervé par les deux systèmes sympathique et parasympathique. Ces deux systèmes se distribuent aux deux muscles, mais avec une prédominance du système sympathique pour le dilatateur et du parasympathique pour le sphincter (Rougier et Riss, 2000). Le réflexe photomoteur (RPM) est décrit dans le schéma de la Figure 13. Il s'agit d'une voie à quatre neurones : **une voie afférente***¹ à deux neurones et une **voie efférente***² constituée par la **voie parasympathique** à deux neurones (Rougier et Riss, 2000).

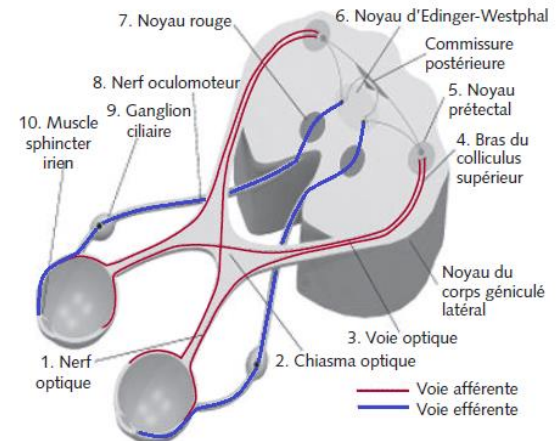


Figure 13. Voies et centres nerveux impliqués dans le réflexe pupillaire à la lumière (la voie efférente sympathique n'est pas représentée ici)

Voie afférente

La voie afférente prend naissance dans la rétine au niveau des cônes, des bâtonnets et des cellules ganglionnaires à mélanopsine. Les axones (ou fibre nerveuse : prolongement du neurone qui conduit le signal électrique du corps cellulaire vers les zones synaptiques) de ces cellules ganglionnaires particulières cheminent au sein du nerf optique ; un peu plus de la moitié de ces fibres

*¹ transport de l'influx nerveux depuis les récepteurs sensoriels vers le système nerveux – **nerfs sensitifs**

*² transmission des commandes du système nerveux aux muscles afin de produire des mouvements volontaires ou involontaires – **nerfs moteurs**

décusse*³ au niveau du chiasma tandis que l'autre emprunte la bandelette optique homolatérale. Ces fibres atteignent ensuite le corps géniculé latéral, mais n'y font pas relais ; elles gagnent le noyau prétectal où elles établissent une synapse (conversion d'un potentiel d'action déclenché dans le neurone présynaptique en un signal dans la cellule postsynaptique). L'innervation est ensuite bilatérale, avec une connexion au noyau d'Edinger-Westphal (sous noyau du III) homolatérale et une connexion controlatérale, la décussation s'effectuant au niveau de la commissure postérieure (Jacob-Lebas & Vignal-Clermont, 2011).

Voies efférentes

Voie parasympathique (voie iridoconstrictrice)

L'innervation parasympathique du sphincter, constricteur, est constituée d'une chaîne à deux neurones. Les premiers neurones partent du noyau d'Edinger-Westphal, situé dans le tronc cérébral, à la partie antérieure du noyau du moteur oculaire commun III. Ils empruntent le tronc du nerf oculomoteur au niveau du ganglion ciliaire. De là partent les fibres postganglionnaires qui se terminent sur le sphincter via les nerfs ciliaires courts (Rougier et Riss, 2000).

Voie sympathique (voie iridodilatatrice)

Le système sympathique est constitué d'une voie très complexe à 3 neurones pour l'innervation du muscle dilatateur de l'iris et est illustré à la Figure 14 (Margolin & Chan, 2008).

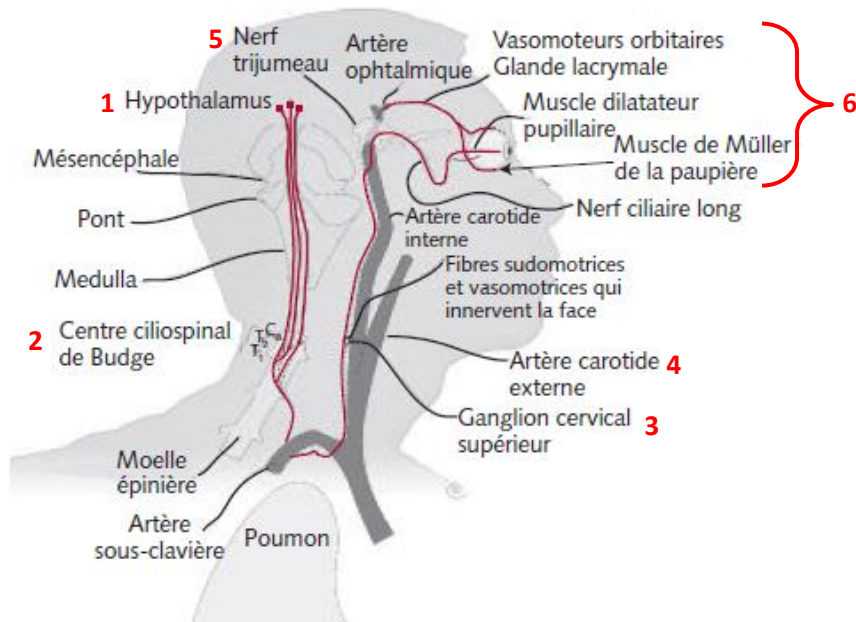


Figure 14. Voie visuelle à trois neurones du système nerveux sympathique

- Les neurones de premier ordre (centraux) prennent naissance dans l'**hypothalamus** (1). Les fibres descendent ensuite dans le mésencéphale et la moelle épinière et vont effectuer leur synapse dans le

*³ Une décussation est, en médecine, un croisement en forme de X. Plus particulièrement, ce terme désigne le passage à travers le plan médian des fibres nerveuses connectant un hémisphère cérébral à la moitié controlatérale du corps

centre ciliospinal de Budge (2) situé dans les colonnes intermédiolatérales de la moelle épinière au niveau de C8 (vertèbre cervicale) à T2 (vertèbre thoracique).

- Les neurones de deuxième ordre (préganglionnaires) quittent la moelle épinière et circulent par le biais de la chaîne sympathique paravertébrale pour effectuer leur synapse dans le **ganglion cervical supérieur (3)** au niveau de la mâchoire.
- Les neurones de troisième ordre (postganglionnaires) quittent le ganglion cervical supérieur et forment un plexus autour de l'**artère carotide externe (4)**. De là, les fibres qui innervent la face suivent l'artère carotide externe, et le reste des fibres pénètre dans la base du crâne par le biais du canal carotidien. Par la suite, ces fibres entrent dans le sinus caverneux via la fosse crânienne moyenne et rejoignent brièvement le sixième nerf crânien avant de suivre la **branche ophtalmique du trijumeau (V1 - 5)** entrant dans le globe oculaire. Par la suite, elles vont bifurquer avec la branche nasociliaire du V1 et entrer dans le globe oculaire par la fissure orbitaire supérieure. Dans le globe oculaire, elles passent à travers le ganglion ciliaire sans effectuer leur synapse et finissent par atteindre leur destination finale où elles innervent le **muscle dilatateur de la pupille, le muscle Müller de la paupière, les glandes lacrymales et d'autres structures (6)**.

Enfin, d'après Wilhelm (2008), les réponses psychosensorielles de la pupille (comme par exemple sa dilatation suite à une surprise ou un stress) sont exclusivement contrôlées par le système sympathique, périphérique et central (Figure 15). En effet, le système sympathique central inhibe le noyau d'Edinger Wesphal, appartenant au système parasympathique. Cette inhibition est exercée par deux voies agissant simultanément. La première dérive du tronc cérébral et atteint le noyau d'Edinger Wesphal via l'hypothalamus. La seconde provient du locus coeruleus, un noyau noradrénergique, et va directement jusqu'au noyau d'Edinger Wesphal. C'est ce noyau, et non le noyau olivaire prétectal, qui est la cible directe de l'inhibition par le système sympathique central.

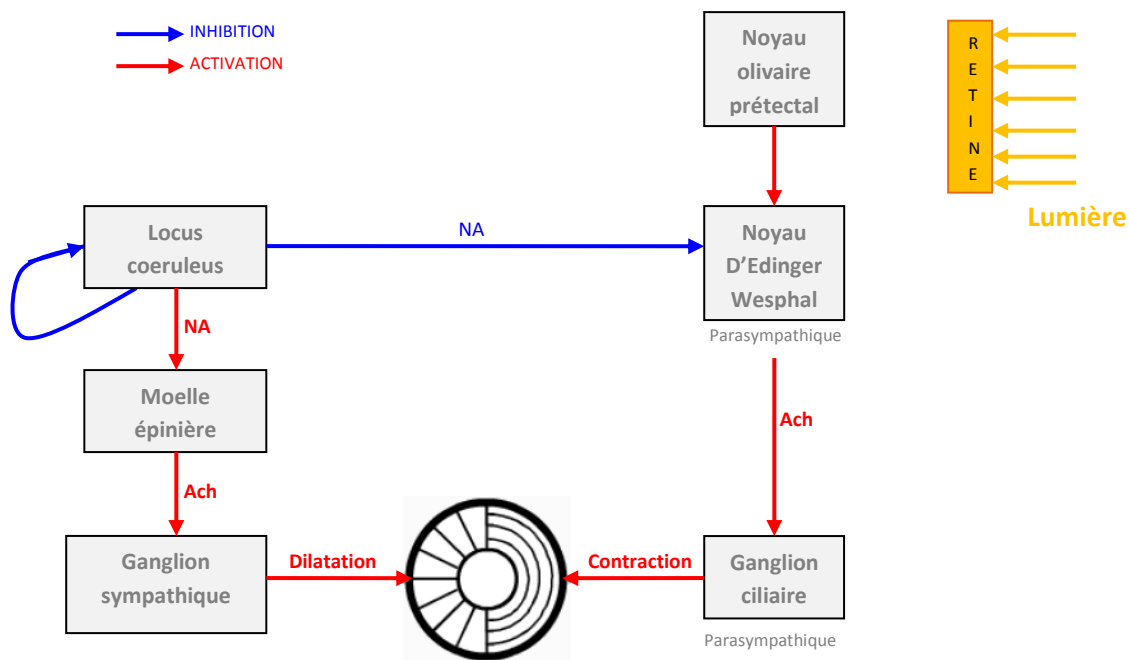


Figure 15. Régulation du diamètre de la pupille (d'après Wilhelm, conférence pupillométrie d'Uppsala, 2010)

1.2. Physiologie de la motilité pupillaire

La motilité irienne est influencée par trois types de facteurs, des facteurs en rapport avec la **fonction visuelle**, des facteurs en rapport avec l'**activité des centres cérébro-spinaux** et enfin des facteurs **humoraux**. Echappant au contrôle volontaire, la pupille est régie sur un mode réflexe (Le rebeller, 1982).

1.2.1. Oscillations pupillaires

L'iris ajuste en permanence la taille de la pupille afin de maintenir un niveau constant d'illumination de la rétine. Ce fonctionnement irien n'est pas un simple réflexe mais résulte d'un processus de régulation. Il existe une boucle de rétroaction qui règle la quantité de lumière provenant à la rétine. Il s'agit en fait d'un « servomécanisme » dans lequel la rétine constitue le « serveur », les centres de la dilatation et de la constriction le « moteur », et l'iris l'effecteur. Ainsi, une augmentation de l'intensité lumineuse provoque une diminution de la taille pupillaire. Ceci s'accompagne d'un changement simultané de la sensibilité rétinienne et ce changement, associé à la diminution de l'illumination rétinienne du fait de la constriction pupillaire, conduit à un réajustement de l'illumination rétinienne par une dilatation pupillaire, et ainsi de suite (Rougier et Riss, 2000).

1.2.2. Réflexe photomoteur (RPM)

Quand l'œil perçoit de la lumière

L'éclairement d'un œil entraîne la contraction pupillaire de cet œil (c'est le RPM direct) et de l'œil controlatéral (c'est le RPM consensuel). La réaction pupillaire varie avec la durée de la stimulation lumineuse. Si la stimulation lumineuse est soutenue, la pupille subira d'abord de larges oscillations, puis se stabilisera progressivement ; c'est ce qu'on appelle le « **réflexe pupillaire tonique** ». En revanche, si la stimulation lumineuse est transitoire, la contraction pupillaire est rapidement suivie d'une redilatation ; c'est ce qu'on appelle le « **réflexe pupillaire phasique** ». La latence de ce réflexe est comprise entre 200 et 250 ms (Rougier & Riss, 2000).

Suite à la capture des rayons lumineux par l'œil, des projections se forment sur la rétine. Comme on l'a vu précédemment, le signal est alors transmis par le nerf optique, et relayé par les axones des cellules ganglionnaires jusqu'au noyau olivaire prétectal, situé dans le mésencéphale. Les neurones de ce noyau se projettent ensuite bilatéralement sur les neurones préganglionnaires du noyau d'Edinger Wesphal, présents des deux côtés du mésencéphale. Ceci explique pourquoi même si la lumière n'est perçue que par un seul œil, les deux yeux réagiront de la même manière au signal lumineux (bilatéralité). Le noyau d'Edinger Wesphal innerve à son tour le ganglion ciliaire, dont les neurones efférents rejoignent le muscle ciliaire. Ce dernier agira enfin sur le sphincter pupillaire de l'iris, et en réponse à la lumière, entrainera la constriction pupillaire des deux yeux (Pritchard & Alloway, 2002).

Quand l'œil perçoit une ombre

La pupille se dilate à l'obscurité. Cette dilatation se déroule en deux phases : une première phase, rapide, suivie d'une seconde, plus lente. La chronométrie de ce processus dépend du niveau préalable d'adaptation à la lumière (Rougier & Riss, 2000).

Le réflexe de mydriase consécutif à l'obscurité ne semble pas être un simple phénomène passif, par relâchement du sphincter irien. Il associe, à partir des récepteurs rétiniens, une inhibition de la voie du réflexe photomoteur dans le mésencéphale et une stimulation de la voie sympathique de l'irido-dilatation, selon un arc réflexe encore mal connu. En effet, après section du sympathique, la mydriase consécutive à l'obscurité est moins prononcée. Les voies anatomiques de la dilatation pupillaire après stimulation sensitive, sensorielle ou psychique sont encore moins connues (Smadja, Mas & de Recondo, 1988).

1.2.3. Réflexe d'accomodoconvergence

Lors de la vision de près, c'est-à-dire de l'accommodation des cristallins et de la convergence des deux yeux, il apparaît un myosis des deux pupilles. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un réflexe, mais plutôt d'une syncinésie (contraction involontaire d'un muscle ou d'un groupe de muscles) qui comporte l'association de ces trois mouvements, tous effectués par le nerf moteur oculaire commun. Le contrôle et la coordination de cette syncinésie sont réalisés par des voies supra-nucléaires (Rougier et Riss, 2000). C'est donc une synergie de trois mécanismes dite « triade de fixation » : L'accommodation qui permet la mise au point sur la rétine, la convergence des globes oculaires qui assure la fusion des images rétinienne, le myosis qui réduit les aberrations dues aux changements de courbure cristallinienne. La constriction du sphincter irien et du muscle ciliaire d'une part, et celle des muscles droits internes d'autre part interviennent alors dans cette action synergique (Smadja, Mas & de Recondo, 1988). La contraction pupillaire débute lorsque l'objet fixé est à 40 cm et devient maximale à 30 cm. Elle ne dépend ni de l'accommodation, ni de la convergence, mais de la vision de près (Larmande & Larmande, 1989 ; Ropert & Lapresle, 1990).

Les voies de la réaction d'accommodation partent de la rétine, suivent les voies optiques jusqu'au cortex visuel, qui se projette sur les noyaux antéro-médians. Elles suivent ensuite la voie finale commune parasympathique pour gagner le ganglion ciliaire (Smadja, Mas et de Recondo, 1988).

1.2.4. Réflexes psychosensoriels

Il existe des réflexes pupillaires autres que le réflexe photomoteur ou encore le réflexe d'accomodoconvergence, ils peuvent être regroupés dans la catégorie des réflexes psychosensoriels. Ainsi certaines situations émotionnelles peuvent engendrer une dilatation pupillaire (peur, surprise, joie). Egalement la corrélation entre dilatation pupillaire et charge cognitive a souvent été démontrée. Cette catégorie de réflexes sera détaillée dans la partie 3 : La pupillométrie comme mesure des activités cognitives et émotionnelles.

2. La pupillométrie comme mesure des activités cognitives et émotionnelles

En psychologie, les études de pupillométrie appartiennent au domaine des sciences appliquées, on les classe dans la catégorie psychologie expérimentale. Ces études n'ont pas pour objectif d'étudier les mécanismes physiologiques des mouvements de la pupille en tant que tels. Au lieu de cela, les réactions sont utilisées comme outils de recherche pour mieux appréhender les phénomènes psychologiques tels que les effets des stimuli sensoriels et émotionnels principalement chez l'homme, ou les stratégies de traitement mental d'une tâche donnée. Aussi, l'utilisation de la pupille n'est pas récente. Loewenfeld (1993) rapporte dans son ouvrage de référence sur la pupille, des études remontant au 18^{ème} siècle. Ces premières études étaient orientées sur les mouvements volontaires de la pupille. Ont suivi des études sur les réflexes conditionnés et d'orientation au début du 20^{ème} siècle puis des travaux sur l'attitude et l'intérêt repris par Hess dans les années 1960. Depuis les années 1960, diverses recherches ont été effectuées sur des stimuli cognitifs et émotionnels.

2.1. La charge cognitive

Au début des années 1960, Hess & Polt (1964) ont rapporté que les changements de la taille de la pupille au cours d'un simple problème de multiplication à résoudre, peuvent être utilisés comme **mesure directe de l'activité mentale**. La réponse de la pupille n'indique pas seulement l'activité mentale, elle est également fortement corrélée à la difficulté du problème à résoudre, la taille de la pupille augmente avec la difficulté du problème. Seulement quelques années plus tard, Bradshaw (1968) rapporta que non seulement la dilatation de la pupille est corrélée à la difficulté du problème à résoudre mais aussi que le pic de dilatation apparaît au moment de la solution. Par la suite, Beatty (1982) à partir de plusieurs jeux de données indiqua que la charge cognitive induite par des tâches de mémorisation, linguistique, de raisonnement ou encore de perception entraînent une réponse pupillaire proportionnelle à la charge de traitement présumée. Il établit alors un classement par tâche et catégorie de tâche (Figure 16). Depuis, cette théorie de corrélation entre activité mentale et dilatation de la pupille a été reprise par de nombreux chercheurs, assistés par des méthodes de mesures plus sophistiquées.

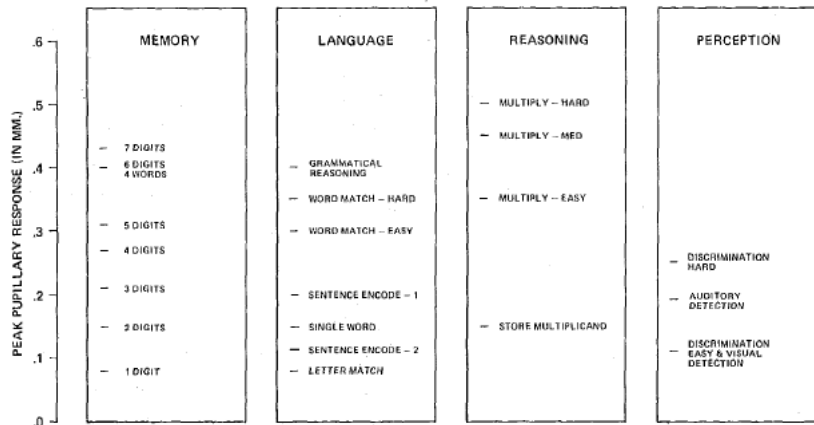


Figure 8. Peak amplitudes of the task-evoked pupillary responses obtained in a range of qualitatively different cognitive tasks, arranged by type of task. (The pupillary response provides a reasonable ordering of tasks on the basis of presumed processing load. See text for further details.)

Figure 16. Amplitudes de dilatation pupillaire par tâche et catégorie de tâche (extrait de Beatty, 1982)

Tout d'abord, les changements pupillaires peuvent être corrélés à la **charge à mémoriser**. En effet, comme Beatty (1982) l'a rapporté, en étudiant la mémorisation à court terme, on met en évidence que plus il y a de choses à mémoriser, plus la pupille dilate. Récemment, cette corrélation a été confirmée, notamment par Klingner, Kumar & Hanrahan (2008) et Piquado, Isaacowitz & Wingfield (2010). Ils ont respectivement pu le démontrer au travers d'une tâche de mémorisation de chiffres (mémorisation et restitution d'une séquence de 6, 7 ou 8 chiffres énoncés à voix haute) et de mémorisation de liste de chiffres ou de phrases. Au-delà du lien entre quantité à mémoriser et dilatation pupillaire, plus il y a de choses à retenir, plus la pupille dilate. Piquado, Isaacowitz & Wingfield (2010) ont également montré que la mémorisation de phrases « Objet-relatif » entraînait une dilatation pupillaire plus importante que la mémorisation de phrases « Sujet-relatif ». Enfin, Espeseth et al. (2010) ont établi que la taille moyenne, l'amplitude du pic et le temps de latence de la pupille augmentent avec la charge cognitive apportée par l'ajout de points à suivre du regard sur un écran, la tâche demandée étant de retrouver des cibles.

Egalement, comme Hess et Polt, beaucoup ont observé une corrélation entre effort cognitif lors de la résolution de problèmes mathématiques et dilatation de la pupille. Beatty (1982), d'après une étude adaptée d'Ahern (1978) montra une dilatation pupillaire lors de la résolution de multiplications proportionnelle au niveau de difficulté. Plus tard, Jainta & Baccino (2010) ont rapporté que les pupilles se dilataient davantage lors de la résolution d'une multiplication que lors de la résolution d'une addition ou encore Stone et al. (2003) ont constaté une dilatation de la pupille plus importante pour des opérations plus difficiles (soustraction de 7 à un nombre entier compris entre 500 et 999) en comparaison à une opération simple (addition d'une unité à des nombres compris entre 1 et 499). Il existe un corpus considérable d'autres travaux disponibles orientés autour de la notion d'effort cognitif au travers de l'étude de différentes **tâches de raisonnement**. Encore une fois, tous démontrent que plus la charge cognitive est importante, plus les pupilles dilatent et ce pour toutes sortes d'effort cognitif. Aussi, Causse et al. (2010) ont mis en évidence une dilatation plus importante lors d'une tâche dynamique (résolution d'une tâche dans un environnement qui évolue) que lors d'une tâche logique. On peut également citer Prehn, Heekeren & van der Meer, 2011 qui ont mis en évidence une allocation de ressources plus importante lors d'une double analogie (relations conceptuelle **et** émotionnelle entre 2 paires de mots). La pupille dilatait moins dans le cas d'une seule analogie ou d'aucune relation, ni conceptuelle, ni émotionnelle entre les 2 paires de mots.

Dans le **domaine linguistique**, Hyona, Tommola & Alaja (1995) constatent que lors de tests de traduction lexicale les mots les plus difficiles à traduire induisent une dilatation plus importante que des mots simples. Le simple fait de s'exprimer dans une langue étrangère, engendre (sauf maîtrise linguistique parfaite) le même phénomène. Egalement, plus tôt, Beatty (1982) rapporta différentes études sur le langage mettant en évidence une dilatation lors de tâches linguistiques proportionnelle au niveau de difficulté. Par exemple, lors d'une tâche grammaticale telle que celle de Baddeley*¹,

*¹ La tâche de Baddeley consiste à présenter au sujet une phrase de la forme « A suit B » (actif-positif), « A est suivie par B » (passif-positif), « A ne suit pas B » (actif-négatif) ou « A n'est pas suivie par B » (passif-négatif : phrases les plus longues et syntaxiquement complexes) en simultané avec une séquence telle que « AB ». Le sujet doit répondre « Vrai » ou « Faux » à la phrase présentée selon si la phrase présentée représente bien la séquence (Exemple, Phrase : « A suit B », Séquence : « AB », Réponse : « Faux »).

l'amplitude de la réponse a été plus grande pour les phrases longues et syntaxiquement plus complexes (Beatty, 1982, adaptation de Ahern, 1978 et Ahern & Beatty, 1981). Autre exemple, au travers d'une étude reprise de Beatty & Schluroff (1980) où les sujets devaient mémoriser des phrases soit standards (organisations syntaxique et sémantique), soit anormales (organisation syntaxique mais pas la tâche de sémantique), soit mélangées (organisation ni syntaxique, ni sémantique), lors de l'encodage de phrase, il a été observé une petite dilatation pour chaque nouveau mot de la phrase. Egalement, ils ont observé une dilatation pupillaire globale pour chaque phrase encodée inversement proportionnelle au niveau d'organisation. De plus, pour les phrases anormales et mélangées, plus elles étaient complexes, plus la pupille dilatait. Enfin, un dernier exemple, à partir d'une étude adaptée de Beatty & Wagoner (1978), Beatty (1982) a montré que la recherche de correspondance entre deux lettres a entraîné une dilatation plus importante quand celle-ci était d'ordre catégoriel (voyelle ou consonne) comparée à quand elle était d'ordre nominal ou encore physique (majuscule ou minuscule).

Egalement, les changements pupillaires peuvent être corrélés aux **capacités cognitives**. En effet, Ullwer et al. (2009) ont mis en évidence que lors de la résolution d'une tâche difficile (tâche d'analogie géométrique), la pupille de sujets avec un haut niveau d'intelligence dilataient plus que les sujets d'intelligence moyenne, et ce d'autant plus que le niveau de difficulté de la tâche était élevé. Au contraire, lors de la résolution d'une tâche simple, la dilatation pupillaire pour les deux groupes de sujets était similaire. Un an plus tard, Borneman et al. (2010) confirment cette observation en établissant que plus le sujet est intelligent plus il est rapide, moins il fait d'erreur, et plus ses pupilles dilatent lors d'une tâche de géométrie analogique non pratiquée à l'école. En revanche aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre dilatation pupillaire et intelligence lors de tâches de transformation algébrique plus communes. Le diamètre pupillaire semble donc retranscrire l'allocation des ressources. Celle-ci est identique entre deux personnes de niveaux d'intelligence différents lors de la résolution d'un problème simple tandis qu'elle est plus importante pour le sujet le plus intelligent lors de la résolution d'un problème plus difficile puisque celui a plus de ressources à aller chercher. Dans le même registre, Ullwer et al. (2010) ont noté une plus grande dilatation de la pupille chez des sujets intelligents lors de la réalisation de tâches de détection de relation. Ces résultats viennent contredire les résultats d'Ahern & Beatty (1979) repris par Beatty (1982) qui montraient une dilatation plus importante pour les sujets les moins intelligents.

La pupille se dilate également lors de tâches de **perception**. Notamment, Beatty (1982) a montré par l'adaptation de deux études de Hakerem & Sutton (1966) et de Beatty & Wagoner (1977) que lors de tâches de perception la pupille se dilatait plus lorsque le stimulus était perçu, surtout quand le sujet était sûr de sa réponse.

Enfin, les changements pupillaires peuvent également permettre la **mesure des ressources allouées** pour une tâche donnée dans différentes conditions. Palinko et al. (2010) ont d'ailleurs démontré que la pupille pourrait remplacer les tests de performance pour la mesure de la charge cognitive. C'est ainsi que Kuchinsky et al. (2013) ont mis en évidence une allocation des ressources plus importante dans un environnement « bruité », notamment pour les personnes âgées, au travers de la dilatation pupillaire. La dilatation pupillaire est plus grande, plus retardée et plus soutenue avec un

rapport signal-bruit de niveau 'difficile'. Cet effet est d'autant plus présent que la tâche est difficile, c'est ce qui a été démontré avec la comparaison d'un affichage avec ou sans compétiteur lors d'une tâche d'identification. Les sujets devaient identifier le mot énoncé parmi 4, 1 cible, 1 mot partageant 1 voyelle et un groupe de consonnes avec la cible et 2 mots différents de la cible (compétiteurs) ou 1 cible, 3 mots différents de la cible (non-compétiteurs). La dilatation a été plus importante dans la condition compétiteur. Dans un registre proche, Johansson et al. (2011) ont montré que lors d'une tâche de compréhension, la pupille est d'autant plus dilatée que l'attention est perturbée. C'est ainsi que lors de l'écoute de musiques, que le sujet ait déclaré aimer ou ne pas aimer écouter cette musique lorsqu'il étudiait, les pupilles étaient plus dilatées en comparaison au silence mais aussi au bruit de fond d'un café.

Le lien étant maintenant bien établi entre dilatation pupillaire et charge cognitive ou allocation de ressources, la pupille est devenue une **mesure** de cette **charge cognitive**. Les études portant sur **la charge cognitive** que nous avons passées en revue dans cette partie sont résumées du Tableau 10 au Tableau 14.

Tableau 10. Etudes portant sur la charge cognitive (mémoire)

Références	Tâche(s)	Brève description des résultats principaux
Beatty, 1982 (Adapté de Kahneman & Beatty, 1966)	Mémorisation de chaînes de 3 à 7 chiffres 3 phases successives distinctes : Affichage, Pause, Réponse	Le diamètre pupillaire augmente durant l'affichage, atteint le maximum à la pause, et retourne à sa ligne de base durant la réponse La dilatation pupillaire est fonction du nombre de chiffres $7 > 6 > 5 > 4 > 3$
	Mémorisation de chaînes de 4 chiffres Mémorisation de chaînes de 4 mots Transformation de chaînes de 4 chiffres en ajoutant un à chaque élément	La dilatation pupillaire est fonction de la difficulté, transformation > mémorisation mots > mémorisation chiffres
Beatty, 1982 (Adapté de Peavler, 1974)	Mémorisation de chaînes de 5, 9 et 13 chiffres	Le diamètre pupillaire augmente jusqu'à la mémorisation de 7 chiffres, au-delà, la courbe devient asymptotique
Klingner et al., 2008 (Inspiré de Kahneman & Beatty, 1966)	Mémorisation et restitution de séquences de 6, 7 ou 8 chiffres	La dilatation pupillaire est fonction du nombre de chiffres de la séquence : $8 > 7 > 6$ Le retour à la ligne de base a été plus rapide pour l'étude de Klingner et al. car la restitution était plus rapide (réponse sur écran) en comparaison à l'étude de Kahneman et Beatty (réponse à voix haute)
Piquado et al., 2010	Mémorisation de listes de 4, 6 et 8 chiffres 2 populations : "jeunes" et "âgés"	La dilatation pupillaire est fonction du nombre de chiffres, $8 > 6 > 4$, et fonction de l'âge, âgés > jeunes - attention pour l'effet âge, les pupilles des plus âgés contractent moins à la lumière que celles des plus jeunes
	Mémorisation de phrases de 2 niveaux de complexité syntaxique (faible, fort) de 9 ou 12 mots 2 phases successives distinctes étudiées : acquisition, rétention	<u>Pendant acquisition</u> : La dilatation est fonction de la longueur de la phrase, longues phrases > courtes phrases <u>Pendant intervalle de rétention</u> : La dilatation est fonction de la longueur de la phrase, longues phrases > courtes phrases, et de la complexité de la phrase, forte > faible

Tableau 11. Etudes portant sur la charge cognitive (raisonnement)

Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Beatty, 1982 (Adapté de Ahern, 1978)	Multiplications avec 3 niveaux de difficulté (facile, moyen, difficile)	La dilatation pupillaire est fonction de la difficulté, difficile > moyen > facile
Bradshaw, 1968	Divisions avec 2 niveaux de difficulté (facile, difficile) Jeux de mots avec 2 niveaux de difficulté (facile, difficile) <u>Consigne</u> : former le plus de mots possible avec les lettres d'un mot donné 2 conditions : Réponse immédiate ou Stockage de la réponse	Divisions : La dilatation pupillaire est fonction de la difficulté, difficile > facile, dans les 2 conditions Le pic de dilatation se produit au moment de la solution/verbalisation Jeux de mots : La dilatation pupillaire est similaire pour les 2 niveaux de difficulté
	Divisions avec réponse à 1 ou 2 chiffre(s) avec 2 niveaux de difficulté (facile, difficile) 5 conditions expérimentales (stratégies de résolution) : 1. Donner réponse à 1 chiffre le plus rapidement possible 2. Donner réponse à 2 chiffres, chiffre par chiffre dès qu'ils sont trouvés 3. Donner réponse à 2 chiffres complète le plus rapidement possible 4. Ne pas verbaliser la réponse avant la fin de l'affichage, ensuite, si possible, donner la réponse complète 5. Même chose que 4 mais appuyer sur un bouton quand solution trouvée	La dilatation pupillaire est fonction de la difficulté, difficile > facile pour les 3 premières conditions La dilatation pupillaire peut être fonction de la condition : condition 3 > condition 2, pour les 2 niveaux de difficulté condition 5 > condition 4 (pendant l'affichage mais pas à la fin de l'affichage) condition 4 (après l'affichage) > condition 2 (facile) et condition 3 Le pic de dilatation se produit au moment de presser le bouton pour la condition 5
Causse et al., 2010	Tâche dynamique (contrôler un réseau de tuyauteries et réservoirs où l'eau s'écoule par gravité, selon les lois de l'hydraulique) qui nécessite la résolution de problèmes dans un monde qui évolue sans cesse au fil du temps Tâche logique (résolution de syllogismes) représentant des processus cognitifs réalisées par des opérateurs face à problèmes quotidiens	La dilatation pupillaire est fonction de la tâche, dynamique > logique

Espeeth et al., 2010	<p>Tâche de recherche (retrouver des cibles)</p> <p>3 phases successives distinctes : image avec points bleus, même image avec certains points qui deviennent rouges (cibles), retour à image initiale, les points bleus se déplacent, il faut retrouver les cibles</p> <p>5 niveaux de charge cognitive (fonction du nombre de points cibles)</p>	La taille de pupille moyenne, l'amplitude du pic de dilatation et le temps de latence augmentent avec la charge cognitive
Gabay, Pertzov & Henik, 2011	<p>Paradigme de Posner avec :</p> <p>Tâche de localisation : Où est la lettre ? Droite ou gauche</p> <p>Tâche de discrimination : Quelle est la lettre ? O ou Q</p> <p>3 phases successives distinctes : image initiale (image avec 3 rectangles : 1 au centre avec un point de fixation au centre, 1 à gauche et 1 à droite), surbrillance d'un rectangle latéral (vrai ou faux indice), apparition d'une lettre (O ou Q) dans un des rectangles latéraux avec réalisation de la tâche</p> <p>Temps variables entre indice et cible (100, 400, 700 et 1000ms)</p>	<p>La dilatation pupillaire est fonction de la tâche lors de la réponse,</p> <p>Discrimination > localisation</p>
Hess & Polt, 1964	Multiplications avec 4 niveaux de difficulté de niveau 1 (7*8) à niveau 4 (16*23)	La dilatation pupillaire est fonction de la difficulté, niveau 4 > niveau 3 > niveau 2 > niveau 1
Iqbal, Zheng & Bailey, 2004	<p>Tâches cognitives avec 2 niveaux de difficulté</p> <p>Compréhension écrite : lecture, questions</p> <p>Raisonnement mathématique : addition de 2 nombres à 4 chiffres, choix parmi 3 réponses possibles (facile) et addition de 4 nombres à 5 chiffres, mémorisation, décision (au-dessus ou non d'un nombre donné) (difficile)</p> <p>Recherche : recherche d'un produit parmi une liste de produits similaires (7) selon une contrainte (facile) ou 3 contraintes (difficile)</p> <p>Manipulation d'objets : classement de courriels selon un critère de taille (facile) ou selon le thème (difficile)</p>	<p>La dilatation pupillaire est fonction de la catégorie (pas plus de précision)</p> <p>La dilatation pupillaire n'est pas fonction de la difficulté au global (alors que le temps de réalisation l'est, difficile > facile) mais est fonction de la difficulté pour la tâche de recherche, difficile > facile</p>
Jainta & Baccino, 2010	Lecture (repérer la lettre L ou R présente parmi les chiffres), addition et multiplication qui représentent 3 niveaux de difficulté (multiplication > addition > lecture)	La dilatation pupillaire, le temps de réaction et le taux d'erreur sont fonction de la difficulté, Multiplication > Addition > Lecture

Klingner, Kumar & Hanrahan, 2008	Vigilance auditive Les sujets écoutent quelqu'un compter de 1 à 19 en ayant été informés que le compteur peut faire une erreur à 6, 12 et 18 avec comme consigne « cliquez dès que vous remarquez l'erreur »	La réponse pupillaire (amplitude, temps de latence, durée et forme) est similaire pour les 3 erreurs
	Multiplications avec 3 niveaux de difficulté (facile, moyen, difficile) Reproduction d'une étude de Ahern & Beatty (1979)	La réponse pupillaire aux multiplications faciles ressemble à la réponse aux multiplications de niveaux "moyen" et "difficile" de l'étude initiale Interprétation : Les étudiants en 1979 pratiquaient plus le calcul mental Résultats uniquement pour "facile", pas assez de données pour les deux autres niveaux de difficulté
Prehn, Heekeren & van der Meer, 2011	Tâche d'analogie le sujet doit indiquer s'il y a analogie (relation conceptuelle ET émotionnelle) lors de la présentation simultanée de 2 paires de mots 4 conditions : Relation conceptuelle et émotionnelle : Con= Emo= (analogie) Relation conceptuelle mais pas émotionnelle : Con= Emo≠ Relation non conceptuelle mais émotionnelle : Con≠ Emo= Relation ni conceptuelle ni émotionnelle : Con≠ Emo≠	La pupille dilate pour les 4 conditions et cette dilatation est fonction de la condition, analogie (Con=, Emo=) > une seule relation (Con= Emo≠) = (Con≠ Emo=) relation conceptuelle mais pas émotionnelle (Con= Emo≠) > relation ni conceptuelle ni émotionnelle (Con≠ Emo≠)
Stone et al., 2003	Opérations mathématiques avec 2 niveaux de difficulté (facile : additionner 1 à un nombre entier compris entre 1 et 499 (ADD 1), difficile : soustraire 7 à un nombre entier compris entre 500 et 999 (SUB7)) Ecran divisé en 25 cellules : 5 colonnes * 5 lignes pour tester la mesure sur écran	La dilatation pupillaire est fonction de la difficulté, SUB7 > ADD1 Même conclusion pour toutes les lignes et colonnes (sauf 1), l'écran peut donc être utilisé pour différencier les charges cognitives
Verney, Granholm & Dionisio, 2001	Tâche d'identification Identification (choix forcé) de la ligne la plus longue parmi 2 lignes verticales de tailles différentes (2 Vs 2.7cm), tâche suivi d'un masque (lignes parallèles de 4cm) Cible et masque séparés de 17, 33, 50, 100, ou 300 ms avant et après les tests, pre et post tests pour tester l'absence de charge cognitive (observation)	Dilatation pupillaire lors des posttests (pas lors des prétests) Interprétation : pendant les posttests, les sujets n'arrivent pas à juste regarder, ils sont encore dans le test, les pretests sont pris comme contrôle "pas de charge" La dilatation pupillaire est fonction de la présence ou non de charge cognitive, charge cognitive (tests) > pas de charge (Pré-tests) et fonction de la condition masque, 300ms > Pas de masque <i>Interprétation : le masque a exigé des ressources de traitement supplémentaires quand il a suivi la cible de plus de 100 ms</i>

Tableau 12. Etudes portant sur la charge cognitive (Langage)

Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Beatty, 1982 (Adapté de Beatty et Wagoner, 1978)	Tâche d'identification (méthode Posner) : Présentation de paires de lettres minuscule(s) ou majuscule(s), le sujet doit dire si il s'agit du même nom - 2 conditions : AA ou aa (1 traitement : physique) / Aa ou bB (2 traitements nécessaires : physique + nom)	La dilatation pupillaire est fonction de la condition, double traitement > simple traitement
	Tâche d'identification (méthode Posner) : Présentation de paires de lettres, le sujet doit dire si elles sont identiques - 3 conditions : identiques en nom, identiques physiquement (majuscule, minuscule), même catégorie (voyelle ou consonne)	La dilatation pupillaire est fonction de la condition, catégorie > nom > physique
Beatty, 1982 (Adapté de Ahern, 1978 ; Ahern & Beatty, 1981)	Tâche d'identification : 2 phases successives distinctes, présentation d'un mot (facile ou difficile selon tests de vocabulaire psychométriques) puis présentation d'un second mot (synonyme ou différent), le sujet doit indiquer si ce second mot est identique ou différent en terme de signification	La dilatation pupillaire est fonction de la difficulté, difficile > facile
	Tâche grammaticale de Baddeley : 2 phases successives distinctes, présentation d'une phrase de la forme "A suit B" ou " B précède A" puis présentation d'une séquence telle que AB, le sujet doit dire si la phrase est vraie ou fausse - 4 conditions : Actif-positif, Actif-négatif, Passif-positif, Passif-négatif	La dilatation pupillaire est fonction de la condition, passif-négatif > actif-positif, actif-négatif, passif-positif
Beatty, 1982 (Adapté de Beatty et Schluroff, 1980)	Tâche de mémorisation : 3 phases successives distinctes, présentation d'une phrase (encodage), pause, rapport - 3 conditions : standard (phrases avec du sens (organisations syntaxique et sémantique) - 2 niveaux de complexité), anormal (mêmes structures syntaxiques mais mots inter changés entre phrases pour rendre la phrase sans signification (organisation syntaxique mais pas sémantique) - 2 niveaux de complexité) et mélangé (aucune organisation ni syntaxique ni sémantique)	La pupille dilate à l'énonciation de chaque nouveau mot La dilatation pupillaire est fonction de la condition, Mélangé > Anormal > standard et fonction de la difficulté pour les conditions anormale et standard, difficile > facile
Hyona, Tommola & Alaja, 1995	Tâches linguistiques : Présentation de 3 textes en anglais (500-600 mots) avec 3 phases successives distinctes : écoute, observation (les sujets lisent à haute voix), interprétation (traduction en finlandais)	La dilatation pupillaire est fonction de la phase, interprétation > observation > écoute
	Tâches linguistiques : Présentation de mots en anglais (125) et en finlandais (145) avec 3 phases distinctes : écoute, observation (les sujets répètent à haute voix), traduction - 2 conditions : Mot difficile = ne peut être traduit en un seul mot dans l'autre langue mais pas une phrase, Mot facile = peut être traduit un seul mot dans l'autre langue (Sujets finlandais)	La dilatation pupillaire est fonction de la phase, traduction > observation > écoute, fonction de la langue, anglais > finlandais, et fonction de la difficulté, mots difficiles > mots faciles

Tableau 13. Etudes portant sur la charge cognitive (Capacités cognitives)

Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Beatty, 1982 (Adapté de Ahern et Beatty, 1979)	Multiplications avec 3 niveaux de difficulté Réalisation par des sujets de capacités cognitives différentes (basses ou hautes)	La dilatation pupillaire est fonction des capacités cognitives, Basses capacités cognitives > hautes capacités cognitives
Borneman et al., 2010	Tâche de géométrie analogique <i>non pratiquée à l'école</i> Tâche de transformation algébrique comprenant les opérations habituellement nécessaires pendant les cours de mathématique Réalisation par des sujets avec différents niveaux d'aptitude cognitive	La dilatation pupillaire est fonction du niveau d'aptitude cognitive lors de la tâche de géométrie, plus intelligent > moins intelligent mais pas lors de la tâche algébrique Pour les deux tâches, plus le sujet est intelligent plus il est rapide, et moins il fait d'erreur, et plus ses pupilles dilatent
Ullwer, 2009	Tâche de localisation (facile) Présentation d'une ligne verticale puis apparition d'un point à gauche ou à droite, le sujet doit dire si le point est à gauche ou à droite Tâche d'analogie géométrique (Difficile) Présentation de 2 paires de damiers, le sujet doit indiquer s'il y a analogie ou pas analogie (3 niveaux de difficulté) Sujets avec différents niveau d'Intelligence fluide (haute intelligence fluide, intelligence fluide moyenne)	La dilatation pupillaire est fonction du niveau d'intelligence pour la tâche difficile (analogie géométrique), surtout pour le niveau difficile, haute intelligence fluide > intelligence fluide moyenne mais pas pour la tâche facile
Ullwer, 2010	Tâche d'analogie géométrique Présentation de 2 paires de damiers, le sujet doit indiquer le type de relation (choix multiple) 2 phases successives distinctes : phase d'apprentissage, phase de transfert (3 catégories : appris, analogues, nouveaux) Sujets avec différents niveaux d'aptitude cognitive	La dilatation pupillaire est fonction de l'intelligence, haute intelligence fluide > intelligence fluide moyenne

Tableau 14. Etudes portant sur la charge cognitive (Perception et Mesure des ressources allouées)

Catégorie	Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Perception	Beatty, 1982 (Adapté de Hakerem & Sutton, 1966)	Présentation de brefs intervalles de luminance, le sujet doit indiquer s'il a vu ou pas la luminance	La dilatation pupillaire est fonction de la perception, Vu > Pas vu, blanc
	Beatty, 1982 (Adapté de Beatty & Wagoner, 1977)	Présentation d'un signal audio, le sujet doit indiquer s'il l'a détecté 5 possibilités : Oui, certain / Oui, incertain / Non, incertain / Non, certain	La dilatation pupillaire est fonction de la perception, Oui, certain > Oui, incertain / Non, incertain > Non, certain
Mesure des ressources allouées	Johansson et al., 2011	Tâche de compréhension de texte 2 phases successives distinctes : lecture, questions à choix multiple 4 Conditions de lecture : Musique que le participant aime écouter en étudiant/lisant, Musique que le participant n'aime pas écouter en étudiant/lisant, Bruit enregistré d'un café, Silence	La dilatation pupillaire est fonction de la condition, musiques > silence, café
	Kuchinsky et al., 2013	Tâche d'identification Enonciation orale d'un mot avec un bruit de fond, le sujet doit identifier ce mot parmi 4 propositions 2 niveaux de rapport signal-bruit (facile, difficile) 2 conditions d'affichage : compétiteur (1 cible, 1 mot partageant 1 voyelle et un groupe de consonnes avec la cible et 2 mots différents de la cible), non-compétiteur (1 cible, 3 mots différents de la cible)	La dilatation pupillaire n'est pas fonction de l'affichage mais du rapport signal-bruit, elle est plus grande, plus retardée et plus soutenue pour rapport signal-bruit niveau difficile surtout avec compétiteur
	Palinko et al., 2010	Tâche d'attention Tâche d'attention : conduite 2 sujets : 1 conducteur + 1 régulateur Echange de questions entre le conducteur et le régulateur interrompu par une tâche linguistique Soit 3 phases successives distinctes : TQ1 = première phase de questions, LL = tâche d'interruption, TQ2 = deuxième phase de questions	Le diamètre pupillaire est fonction de la phase, TQ2, LL > TQ1 et fonction du rôle, LL_conducteur < LL_régulateur

2.2. L'encodage mnésique

Les variations pupillaires peuvent également être mises en relation avec le processus de mémoire. On peut par exemple noter que les premières études consistant à étudier la relation entre la taille de la pupille et la mémoire ont révélé une tendance surprenante. Gardner, Mo, & Borrego (1974) ont observé que des syllabes dépourvues de sens mais connues par le biais d'une pré-exposition, par rapport à des syllabes dépourvues de sens mais inconnues, ont abouti à une réaction pupillaire différente. Des études récentes ont étudié le potentiel de la pupillométrie comme outil pour étudier les processus cognitifs qui sous-tendent la création de nouveaux souvenirs épisodiques et leur récupération ultérieure. On a ainsi montré que la dilatation pupillaire peut-être un indicateur de la qualité de l'encodage mnésique : les stimuli ayant occasionné une plus large dilatation lors de l'encodage seront mieux rappelés (ou reconnus) ensuite (Võ et al., 2008 ; Papesh, Goldinger & Hout, 2012). De même, ces items entraîneront une dilatation plus importante lors de la reconnaissance, signe d'une meilleure qualité de la trace mnésique. On ne parlera pas ici de la mémorisation à court terme déjà traité dans le paragraphe.

Beaucoup d'études se sont intéressées à l'**effet « ancien/nouveau »** (traduit de l'anglais « **old/new effect** »). Võ et al. (2008) ont publié une étude qui avait pour objectif d'étudier cet effet avec des mots émotionnels ou neutres. Ces mots ont été sélectionnés à partir du BAWL (Berlin Affective Word List ; Vo et al., 2006). Les participants devaient lors d'une phase d'étude, mémoriser le plus de mots possible et lors d'une phase de test, indiquer si le mot était nouveau ou leur avait déjà été présenté. Il a été observé un biais de reconnaissance à cause du contenu émotionnel, les mots déjà présentés et à caractère émotionnel étaient mieux reconnus. Egalement, pour les nouveaux mots à caractère émotionnel, il y avait plus de mauvaises "acceptations" (oui il m'a déjà été présenté) par rapport aux mots neutres. Enfin, au niveau pupillaire, il a été observé une dilatation plus importante pour les mots correctement identifiés comme déjà présentés que pour les mots correctement identifiés comme nouveau. L'effet était diminué pour les mots émotionnels. Ainsi ceci signifie que l'effet ancien/nouveau sur la pupille n'est pas seulement en mesure de refléter les processus de récupération de la mémoire, mais reflète également la modulation par un biais de la reconnaissance des émotions induites. Dans le même registre, Otero et al. (2011) ont observé dans une première expérience, une dilatation plus importante pour des mots pré-exposés par rapport à des mots nouveaux. De plus, lorsque que le sujet répondait que le mot avait déjà été présenté, des mesures de souvenir et de familiarité ont été effectuées et ont permis de mettre en évidence une plus grande dilatation pupillaire pour les souvenirs que pour la familiarité. Dans une seconde expérience ils ont constaté que la pupille se dilatait plus pour des mots pré-exposés pour un encodage profond (générer un synonyme) que pour des mots pré-exposés pour un encodage peu profond (compter les syllabes) ou encore que pour des mots non pré-exposés. Ceci rejoint l'idée que la dilatation pupillaire peut être le reflet de la qualité de la trace mnésique citée plus haut. Pour compléter l'observation faite par Otero et al. (2011) sur la familiarité, Wu et al. (2010) ont montré dans une étude similaire mais sur des photos de visages, que pendant la phase d'étude la pupille se dilatait plus pour des visages de même origine ethnique que le participant par rapport à des visages d'une autre origine alors que pendant la phase de reconnaissance, seul l'effet ancien/nouveau a été mis en évidence, la pupille dilatait plus pour les anciens visages que pour les nouveaux. Aucun effet

race n'a été mis en évidence alors qu'en terme de reconnaissance les participants se souvenaient mieux des visages de même race. Enfin, dans ce même registre, une observation contradictoire a été faite par Laeng en 2010 qui mentionne une expérience réalisée avec des personnes amnésiques, présentant une plus forte dilatation de la pupille lorsqu'elles voient des images nouvelles, par contraste avec des photos vues lors d'une précédente session (notons ici que pour ces patients atteints de troubles de la mémoire, toutes les photos sont considérées comme nouvelles). Cela prouve que la mesure pupillaire pourrait être une mesure permettant de mettre en évidence des troubles de la mémoire.

Un autre phénomène ayant trait à la mémoire est la **violation des attentes**. Notre mémoire fait que nous considérons des choses comme normales ou anormales. Dans ce registre, on retrouve la violation temporelle. On appelle violation temporelle le fait que des actions qui ont l'habitude de se dérouler dans un ordre particulier, se déroulent dans un autre ordre. Raisig et al. (2007 ; 2010) ont réalisé deux expériences dans lesquelles ils présentaient aux sujets des événements constitués de 3 éléments. Ces éléments pouvaient être présentés dans six configurations (A-B-C, A-C-B, etc.), correspondant à une des quatre conditions suivantes : pas de violation temporelle (correct/correct), violation temporelle entre les deux premiers éléments, pas entre les deux derniers (correct/faux), violation temporelle entre les deux derniers éléments, pas entre les deux premiers (faux/correct) et enfin, double violation temporelle (faux/faux). Dans une première expérience, les éléments étaient présentés en triplète et les sujets devaient indiquer s'il y avait violation temporelle ou non. Dans une seconde expérience, les éléments étaient présentés un à un, et les sujets devaient indiquer à chaque élément s'il y avait violation temporelle (si il y avait violation temporelle dès le 2^{ème} élément, le 3^{ème} n'était pas présenté). Dans la première expérience ils ont mis en évidence une dilatation pupillaire corrélée avec le temps de réaction plus importante pour les configurations correct/faux par rapport aux configurations correct/correct, faux/correct. Egalement le taux d'erreur était impacté par la configuration avec par ordre croissant de taux d'erreur, les configurations correct/correct puis correct/faux et faux/faux et enfin faux/correct. Ainsi, on peut dire que l'information temporelle de la séquence complète affecte le processus de décision. Dans la deuxième expérience ils ont mis en évidence une dilatation pupillaire pour les violations temporelles et une dilatation pupillaire plus importante lors des bonnes réponses comparées aux mauvaises réponses. Aussi, la dilatation de la pupille peut être utilisée pour appréhender les capacités cognitives de l'enfant en bas âge et c'est ainsi que Jackson & Sirois (2009) ont rapporté que les pupilles de bébés de 8 mois se dilataient face à des événements impossibles (Changement de couleur d'un train électrique entre avant et après le passage dans un tunnel). Par ailleurs, Gredebäck (2010) a réalisé des expériences avec des bébés de 4, 6 et 12 mois regardant des vidéos présentant des interactions sociales entre deux adultes : l'un donne à l'autre une cuillère remplie de banane. Deux situations se présentent ensuite : soit la cuillère est tendue jusqu'à la bouche du protagoniste (action rationnelle), soit elle est renversée sur sa main (action irrationnelle). Lorsque les bébés sont face à la situation irrationnelle, les expérimentateurs observent une dilatation de leurs pupilles. Cependant, un doute persiste quant à la signification de cette réponse pupillaire : représente-t-elle vraiment une évaluation de l'action par le jeune enfant ? D'autres expériences ont été menées avec des enfants. Par exemple, selon Hepach & Westermann (2010), des enfants de 14 mois ont une dilatation pupillaire plus importante lorsqu'ils sont face à une situation incongrue (par exemple, face à une personne en colère caressant une peluche ou à l'inverse, une personne souriante frappant cette

même peluche). Cela suit alors un schéma prédéfini : « concept d'émotions → Attentes → Violation des attentes → Surprise → Dilation des pupilles ».

Les études portant sur **la mémoire** que nous avons passées en revue dans cette partie sont résumées dans le Tableau 15 et le Tableau 16.

Tableau 15. Etudes portant sur la mémoire (Nouveauté, familiarité et encodage mnésique)

Catégorie	Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Nouveauté	Gardner et al., 1974	Tâche de mémorisation 2 phases successives distinctes : présentation de 10 Consonne-Voyelle-Consonne (CVC) à faible signification à mémoriser puis présentation d'une liste avec ces 10 même CVC + 10 de même signification, le sujet doit indiquer si la séquence CVC est nouvelle ou ancienne	La dilatation pupillaire est fonction de la nouveauté, ancienne > nouvelle
	Laeng, 2010	Tâche de mémoire visuelle avec sujets amnésiques 2 phases successives distinctes : présentation d'une série d'images puis présentation de ces mêmes images + des nouvelles	La dilatation pupillaire est fonction de la nouveauté, nouvelle > ancienne
	Võ et al., 2008	Tâche de mémorisation 2 phases successives distinctes : Phase d'étude : présentation de mots Phase de test : présentation des mêmes mots + d'autres, le sujet doit indiquer si le mot est ancien ou nouveau Stimuli : Mots émotionnels ou neutre	La dilatation pupillaire est fonction de la nouveauté, correctement identifié comme ancien > correctement identifié comme nouveau avec un effet atténué pour les mots émotionnels
		Tâche de mémorisation en 2 phases successives distinctes : - phase d'apprentissage : présentation de mots	La dilatation pupillaire est fonction de la nouveauté, ancien > nouveau et de la familiarité, non familier > familier
Encodage mnésique	Otero et al., 2011	- phase de reconnaissance : présentation de mots (cibles et distracteurs) : le sujet doit indiquer si le mot est ancien ou nouveau Si participant répond 'ancien', des mesures de souvenir et de familiarité sont effectuées	Pendant phase d'apprentissage, 2 instructions possibles : compter les syllabes (codage peu profond) ou générer un synonyme (codage profond) La dilatation pupillaire est fonction de l'encodage, codage profond > codage peu profond
Familiarité	Wu et al., 2010	Tâche de mémorisation 2 phases successives distinctes : Phase d'étude : présentation de photos de caucasiens (même race que les sujets) et asiatiques (autre race) à l'expression neutre Phase de reconnaissance : présentation des mêmes photos ou de nouvelles, le sujet doit indiquer si la photo est ancienne ou nouvelle	La dilatation pupillaire est fonction de la race autre race > même race lors de la phase d'étude mais pas lors de la phase de reconnaissance et fonction de la nouveauté, ancien > nouveau (meilleure reconnaissance des visages de même race)

Tableau 16. Etudes portant sur la mémoire (Violation des attentes)

Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Gredebäck, 2010	Tâche d'observation : Présentation de vidéos présentant des interactions sociales entre deux adultes, l'un donne à l'autre une cuillère remplie de banane, soit la cuillère est tendue jusqu'à la bouche du protagoniste (rationnel), soit la cuillère est renversée sur sa main (irrationnel)	La dilatation pupillaire est fonction de la rationalité, action irrationnelle > action rationnelle
Hepach & Westermann, 2010	Tâche d'observation : Des vidéos de situations irrationnelles, combinaison d'une action (joyeuse ou en colère) et d'une expression faciale (joyeuse, en colère ou neutre) sont présentées Ex : personne en colère caressant une peluche ou à l'inverse, une personne souriante frappant cette même peluche	La dilatation pupillaire est fonction de la rationalité, irrationnelles > neutres
Jackson & Sirois, 2009	Tâche d'observation : Des vidéos d'un train électrique coloré en rouge vert ou bleu qui passe dans un tunnel et ressort de couleur identique ou différente sont présentées 2 conditions conceptuelles (possible, impossible) : couleur du train avant/après tunnel identique ou différente 2 condition perceptuelles (couleur familière ou couleur nouvelle nouvelles)	La dilatation pupillaire est fonction de possibilité, impossible > possible quand la couleur du train est nouvelle et non familière
Raisig et al., 2007	Tâche d'identification d'ordre temporel : Présentation de différents événements (séquence de 3 éléments mis dans l'ordre temporellement ou non), le sujet doit indiquer si l'ordre temporel des éléments est respecté - 4 condition (6 configurations) : - correct/correct (A - B - C) : pas de violation temporelle - <i>correct/faux</i> (A - C - B ou B - C - A) : violation temporelle entre les deux premiers éléments, pas entre les deux derniers - <i>faux/correct</i> (B - A - C ou C - A - B) : violation temporelle entre les deux derniers éléments, pas entre les deux premiers - <i>faux/faux</i> (C - B - A) : double violation temporelle	La dilatation pupillaire est fonction de la condition : correct/faux > correct/correct, faux/correct (Taux d'erreur (correct/correct < correct/faux, faux/faux < faux/correct))
Raisig et al., 2010	Tâche d'identification d'ordre temporel Idem que Raisig et al. 2010 sauf que les éléments sont présentés un à un et qu'avant le titre de l'évènement est présenté Soit successivement, titre, élément1, élément 2 puis 2 possibilités, si pas de violation temporelle et/ou pas de réponse, élément 3 puis fin, si violation temporelle, fin	La dilatation pupillaire est fonction de la temporalité, violation temporelle > pas de violation temporelle et fonction de la réponse, bonne réponse > mauvaise réponse

2.3. Les stimuli émotionnels

Hess & Polt démontrent dès 1960, une relation de corrélation entre le niveau d'intérêt et la dilatation de la pupille. En effet, au travers d'une étude visant à mesurer le diamètre pupillaire d'hommes et de femmes durant la présentation de photos, il a montré que les pupilles de femmes se dilataient d'avantage devant une photo de bébé, de maman avec son bébé ou encore d'homme dénudé alors que celles des hommes se dilataient d'avantage devant une photo de femme dénudée. Enfin, lors de la présentation d'une image de paysage, ni les pupilles des hommes, ni celles des femmes ne dilataient ($n = 6$, 4 hommes, 2 femmes). Depuis, de nombreuses études ont étudié la relation entre émotion et dilatation pupillaire.

Suite aux observations d'Hess & Polt (1960) beaucoup d'auteurs se sont intéressés à l'effet de **stimuli sexuels** sur le diamètre pupillaire. C'est ainsi que près de quarante ans plus tard, Aboyoun (1998) reprit leurs travaux et publia une étude qui met en évidence une dilatation de la pupille plus importante devant des photos de personnes nues comparée à celle devant des photos de personnes vêtues et ça, quel que soit le sexe du sujet et de la personne cible en cours de visualisation. Laeng & Falkenberg (2007) complétèrent cette étude en stipulant que le diamètre de la pupille est proportionnel au niveau d'intérêt de l'observateur, et en relation avec l'attirance sexuelle et la phase du cycle menstruel de la femme. Ainsi, au moment de l'ovulation, les femmes qui ne sont pas sous pilule voient leurs pupilles se dilater lorsqu'elles regardent les photos de leur conjoint ou de leur idole masculine. La pupillométrie a donc permis ici de capturer des réponses marquant l'attention à des stimuli émotionnels que les participantes ont eues de manière inconsciente. Dans le même registre on peut également citer, Bernick et al. (1971) qui rapportèrent que la pupille se dilate lors du visionnage de films érotiques homosexuels ou hétérosexuels et cela, autant que devant un film à suspense. Plus récemment, Rieger & Savin-Williams (2012) ont publié une étude visant à étudier la réaction pupillaire pendant la diffusion de vidéos d'un homme ou d'une femme nu(e) en train de se masturber, chez des hommes et des femmes, hétérosexuels, homosexuels ou bisexuels. Ils ont ainsi montré une corrélation négative entre dilatation pupillaire pour une personne du même sexe et dilatation pupillaire pour une personne de l'autre sexe chez les hommes comme chez les femmes. Egalement, ils ont observé que chez les hétérosexuels, la dilatation pupillaire était plus importante pour les personnes de l'autre sexe que pour le même sexe et inversement chez les homosexuels. De manière plus étonnante, alors qu'une dilatation importante pour les deux sexes a été plus souvent observée chez les hommes bisexuels, chez les femmes cela a été plus fréquemment observé chez les hétérosexuelles.

De manière plus large, les auteurs ont mis en évidence que **toute stimulation émotionnelle** entraîne une dilatation pupillaire. Bradley et al. (2008) ont utilisé des images émotionnelles pour étudier l'effet de la valence hédonique et d'une stimulation émotionnelle sur la réponse pupillaire. Parmi ces images, sélectionnées à partir du "International Affective Picture System" (IAPS: Lang et al., 2005), un tiers étaient considérées comme plaisantes, un tiers neutres et un tiers déplaisantes. Les résultats montrent que le diamètre de la pupille est significativement affecté par l'émotion dégagée par la photo : la pupille était plus dilatée quand le sujet était face à des images stimulantes émotionnellement, que ce soit positivement ou négativement. D'autres mesures ont également été effectuées en parallèle, et

permettent de dire que ces changements pupillaires co-varient avec les changements de conductivité de la peau, mais pas avec la fréquence cardiaque. Ainsi, cela confirme le fait que le diamètre de la pupille reflète l'activité du système nerveux sympathique. Des résultats similaires ont pu être observés lors de l'écoute de sons émotionnels (Partala & Surakka, 2003). Enfin, Geangu et al. (2011) établirent la présence d'une réponse aux stimuli émotionnels dès la seconde moitié de la première année de vie en présentant des vidéos de bébés manifestant des états émotionnels positifs (bonheur, rire), négatifs (colère, pleurs) et neutres (babillage) à de jeunes enfants de 6 et 12 mois. Dans le même registre, Kuchinke et al. (2007) ont révélé par l'utilisation de mots sélectionnés à partir du BAWL (Berlin Affective Word List ; Vo et al., 2006) que la fréquence des mots avait une influence sur le diamètre pupillaire même si aucun effet de la valence émotionnelle n'était observé. Egalement, en utilisant des mots du même recueil, Bayer et al. (2011) ont mis en évidence que l'excitation émotionnelle attribuée aux mots n'active pas obligatoirement le système nerveux autonome, mais fonctionne plutôt sur le plan cognitif, facilitant le traitement de texte. Enfin, Honma et al. (2012), ont rapporté que la conscience du regard de l'autre entraînait chez la personne observée une dilatation pupillaire. Egalement, il a été montré une dilatation plus importante chez une personne observée lorsque le regard était dirigé vers les yeux.

Enfin, en étudiant l'effet de stimuli émotionnels sur le diamètre pupillaire chez des personnes atteintes de la **maladie** de Parkinson, Dietz et al., (2011) mirent en évidence une excitation sympathique normale à des stimuli affectifs (indexés par le diamètre pupillaire) mais des différences oculomotrices. En effet, en utilisant eux aussi des images de l'IAPS, ils observent un nombre de fixations et un temps d'analyse moindres chez les sujets malades par rapport à des sujets sains, mais un comportement pupillaire similaire avec une dilatation pour les images émotionnelles plus importantes que pour les images neutres. Dans un registre similaire, Kuchinke et al. (2011) ont montré une perception et une reconnaissance des phrases à valence positive réduites et dépendantes de la tâche à effectuer chez des personnes atteintes de la maladie d'Asperger (trouble du développement caractérisé par des déficits marqués en communication socio-émotionnelle avec des difficultés dans le domaine du traitement de la prosodie). Des phrases neutres émotionnellement étaient prononcées soit de manière négative, soit de manière positive, soit de manière neutre. Les sujets devaient effectuer 2 types de tâche, écouter les phrases sans information particulière au préalable (tâche spontanée) ou évaluer la valence émotionnelle des phrases sur une échelle de 7 points (de -3, négatif, 0, neutre, à trois, positif) (tâche explicite). Lors de la tâche explicite, une dilatation plus importante a été observée pour les phrases à intonation positive et négative par rapport aux phrases à intonation neutre, et ceci sans effet groupe (malades/sains). Lors de la tâche spontanée il n'y avait ni effet émotion, ni effet groupe mais une interaction émotion*groupe avec une dilatation plus importante pour les phrases à intonation négative par rapport aux phrases à intonation positive et neutre chez les malades alors que chez les personnes saines, on observait une dilatation plus importante pour les phrases à intonation positive par rapport aux phrases à intonation négative et par rapport aux phrases à intonation neutre. Enfin Siegle et al. (2001 ; 2003) ont travaillé avec des sujets dépressifs. Dans une première étude ils ont décrit que les dépressifs n'avaient pas un accès direct aux aspects émotionnels de l'information, mais pouvaient continuer à les traiter après réaction. Dans une seconde étude, ils ont montré une dilatation pupillaire plus soutenue pour les dépressifs particulièrement manifeste en réponse à l'information émotionnelle négative personnellement pertinente. Cette observation a été faite pour différentes tâches, une tâche non

émotionnelle, la tâche “Sternberg memory” (présentation de 3 nombres à 2 chiffres puis une cible, question : « Avez-vous déjà vu ce nombre ? » Oui ou non) et deux tâches émotionnelles (identification de valence (positif, négatif ou neutre) et évaluation de la pertinence personnelle de phrases (non pertinent, non personnellement pertinent, personnellement pertinent)).

Les études portant sur les **stimuli émotionnels** que nous avons passées en revue dans cette partie sont résumées du Tableau 17 au Tableau 19.

Tableau 17. Etudes portant sur les stimuli émotions (excitation sexuelle)

Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Aboyoun et al. 1998	Tâche d'observation Présentation de photos d'hommes et de femmes nu(e)s ou habillé(e)s	La dilatation pupillaire est fonction de l'excitation sexuelle, personnes nues > personnes habillées
Bernick et al., 1971	Tâche d'observation <i>Présentation</i> de films érotiques (hétérosexuel ou homosexuel masculin) ou à suspense	La dilatation pupillaire n'est pas fonction du film, elle est significative mais équivalent pour les 3 films
Hess & Polt, 1960	Tâche d'observation Présentation de photos : Bébé, Maman et son bébé, Femme nue, Homme nu et Paysage à 2 groupes (hommes, femmes)	La dilatation pupillaire est fonction du sexe, pour les photos de bébé, maman et son bébé et homme nu, femmes > hommes et pour les photos de femme nue, hommes > femmes Pas de dilatation pupillaire pour le paysage
Laeng & Falkenberg, 2007	Tâche d'observation Présentation de photos à des femmes: Photos d'acteurs célèbres dont l'acteur préféré de la participante (ex : Brad Pitt) Photos d'actrices célèbres dont l'actrice préférée de la participante (ex : Angelina Jolie) Photos de personnalités norvégiennes connues (ex : présentateur météo) Photos de petits amis, celui de la participante et ceux de 4 autres Les femmes ont été testées durant 3 différentes phase de leur cycle : Phases ovulatoire, lutéale et menstruelle et 50% prenaient la pilule	Les effets sont principalement observés chez les femmes qui ne prennent pas la pilule : La dilatation pupillaire est fonction de la photo, petit-ami, acteur préféré, célébrité > autres acteurs, autres petit-amis > actrices préférées, autres actrices (contraction pour ces deux derniers types de photos) La dilatation pupillaire est fonction du cycle, dilatation pendant phase ovulatoire et contraction pendant phases lutéale et menstruelle Int. Photo * Cycle : Les plus grand changements sont pour petit-ami et acteur préféré uniquement pendant phase ovulatoire Pour celles qui prennent la pilule : La dilatation pupillaire est fonction de la photo, acteur favori > autres
Rieger & Savin-Williams, 2012	Tâche d'observation présentation de vidéos montrant soit un homme soit une femme nu(e) en train de se masturber 7 groupes de sujets : hétérosexuel, surtout hétérosexuel, avec penchant bisexuel, bisexuel, avec penchant bisexuel gay, surtout gay, et gay	La dilatation pupillaire est fonction du sexe de la personne de la vidéo et de l'orientation sexuelle : chez les hétérosexuels : autre sexe > même sexe chez les homosexuels : même sexe > autre sexe chez les hommes : dilatation importante pour les deux sexes plus fréquente chez les bisexuels chez les femmes : dilatation importante pour les deux sexes plus fréquente chez les hétérosexuelles

Tableau 18. Etudes portant sur des stimuli émotionnels divers

Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Bayer et al., 2011	2 tâches de différents niveaux cognitifs (lecture / tâche de décision lexicale) et 1 tâche de reconnaissance (non annoncée) Stimuli : noms émotionnels positifs, négatifs ou neutre (valence) à fort ou faible arousal, soit 6 catégories	La contraction pupillaire à la lumière est fonction de la tâche, tâche lexical < lecture, de l'arousal, fort "arousal" < faible "arousal", et de la valence négatif > positif, neutre (tendance seulement)
Bradley et al., 2008	Tâche d'observation Présentation d'images émotionnelles (32 plaisantes, 32 neutres, 32 non plaisantes)	La dilatation pupillaire est fonction de la présence d'émotion, images émotionnelles > Images neutres La dilatation pupillaire covarie avec la réponse électrodermale
Geangu et al., 2011	Tâche d'observation Présentation de vidéos de bébés manifestant des états émotionnels positifs (bonheur, rire), négatifs (colère, pleurs) et neutres (babillage) à 2 groupes d'enfants de 6 et 12 mois	La dilatation pupillaire est fonction de l'émotion, vidéos négatives > vidéos neutres, vidéos positives > vidéos neutres (pour des intervalles de temps plus courts)
Honma et al., 2012	Tâche de localisation 2 sujets face à face (un observateur et un observé) L'observateur a pour consigne de regarder des points précis du visage de l'observé L'observé doit indiquer là il pense que l'observateur regarde (index gauche)	La dilatation pupillaire est fonction de la direction du regard, regard dans les yeux > regard pas dans les yeux et de la conscience du regard, conscience du regard > pas conscience du regard
Kuchinke et al., 2007	Tâche de décision lexicale Stimuli : noms émotionnels positifs, négatifs ou neutre (valence) à basse ou haute arousal	La dilatation pupillaire est fonction de la fréquence, basse fréquence > haute fréquence mais pas de la valence
Partala & Surakka, 2003	Tâche d'écoute Présentation de sons émotionnels positifs, négatifs ou neutres (ex: bébé qui rit, couple se battant, bruits de bureau)	La dilatation pupillaire est fonction de la présence d'émotions mais pas de la valence, positif, négatif > neutre

Tableau 19. Etudes portant sur des stimuli émotionnels (chez les malades)

Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Dietz et al., 2011	Tâche d'observation Présentation d'images émotionnelles à 2 groupes (sujets sains, sujets malades (Parkinson))	La dilatation pupillaire est fonction de la présence d'émotion, images émotionnelles > Images neutres pour malades et sains (Les mouvements oculaires sont fonction du groupe : nombre de fixations : parkinsoniens < sains temps d'analyse : parkinsoniens < sains)
Kuchinke et al., 2011	Tâche d'écoute Présentation de phrases neutres émotionnellement prononcées négativement, positivement ou de manière neutre à 2 groupes (malades atteints du syndrome d'Asperger* / sujets sains) 2 conditions : tâche spontanée : écoute (pas d'information) tâche explicite : évaluation de la valence émotionnelle de chaque phrase sur une échelle de 7 points	La dilatation pupillaire est fonction de la présence d'émotion pour la tâche explicite, positif, négatif mais pas pour la tâche spontanée La dilatation pupillaire n'est pas fonction du groupe mais pour la tâche spontanée interaction émotion*groupe, malades : Négatif > Positif, Neutre alors que sains : positif > négatif > neutre
Siegle et al., 2001	Tâche lexicale Présentation de mots positifs, négatifs et neutres imposés et générés par chaque sujet + non-mots créés à partir de 6 mots positifs, 6 négatifs et 6 neutres en changeant l'orthographe (pas de sens mais prononçable) Le sujet doit dire si oui ou non il s'agit d'un mot ou si la valence est positive, négative ou neutre	La dilatation pupillaire est fonction du groupe, non dépressifs > dépressifs au départ, dépressifs > non dépressifs dans la deuxième partie du signal (charge plus faible mais plus soutenue pour les dépressifs) La dilatation pupillaire n'est pas fonction de la valence pour les 2 groupes
Siegle et al., 2003	Tâche non émotionnelle : 'Tâche "Sternberg memory" + 2 tâches émotionnelles Présentation de 3 nombres à 2 chiffres puis une cible, le sujet doit dire s'il a déjà vu cette cible Présentation de mots, le sujet doit identifier la valence (positive, négative ou neutre) et évaluer sa pertinence (non pertinente, non personnellement pertinente, personnellement pertinente) 2 groupes de sujets : dépressifs et sains	La dilatation pupillaire est fonction du groupe, dépressif > sains (particulièrement manifeste en réponse à l'information émotionnelle négative personnellement pertinente)

*Syndrome d'Asperger : trouble du développement caractérisé par des déficits marqués en communication socio-émotionnel et des difficultés dans le domaine du traitement de la prosodie

2.4. Les stimuli gustatifs et olfactifs

Très peu d'études ont été menées concernant la relation entre le diamètre pupillaire et des stimuli olfactifs ou gustatifs (Tableau 20). Une des premières a été mise en place par Hess & Polt, en 1966. Leurs recherches préliminaires ont permis de s'apercevoir que lorsqu'une personne goûtait différents liquides, sa pupille changeait de taille. Les auteurs se sont ensuite rendus compte qu'en matière de gustation, un fort stimulus, qu'il soit positif ou négatif, menait à une augmentation du diamètre de la pupille. Ils ont alors mis au point une étude avec 16 sujets devant tester cinq jus d'orange (semblables en saveur mais légèrement différents les uns des autres) et cinq échantillons d'eau, le premier échantillon d'eau était présenté au début, puis les quatre autres étaient chaque fois présentés entre deux jus. Il en résulte des différences significatives parmi les réponses pupillaires aux stimuli « orange ». Hess & Polt concluent alors que l'activité de la pupille peut être utilisée comme **indicateur de sensibilité au goût et peut-être aussi aux préférences**. A l'heure actuelle, et d'après la recherche bibliographique effectuée, aucun autre article n'a vérifié cette conclusion.

Plus de 40 ans plus tard, Schneider et al. (2009) réalisent une expérience afin de savoir si la réponse pupillaire à des stimuli odorants reflète leur intensité ou l'hédonisme qui leur est lié. Pour cela, ils utilisent des **stimulants olfactifs** (les odeurs de rose et d'œuf pourri), un **irritant trigéminal** (le dioxyde de carbone) et un **stimulant trigéminal et olfactif** (l'odeur de citron). Trois résultats ressortent de cette étude. D'une part, la stimulation olfactive avec ces quatre odeurs entraîne une dilatation reproductible de la pupille, effet de l'activation du système sympathique. D'autre part, il y a une corrélation négative significative entre l'intensité et les temps de latence de début et fin de réaction, plus le stimulus était intense plus la réaction était rapide. Enfin, les auteurs ne trouvent pas de corrélation entre la réaction pupillaire et l'hédonisme lié aux stimuli. En résumé, les modifications de diamètre de la pupille indiquent des **différences entre les modalités du stimulus et la force des stimuli**, mais ne sont **pas liés à la valeur hédonique** des odeurs.

Tableau 20. Etudes portant sur les stimuli olfactifs et gustatifs

Ref	Facteurs étudiés	Matériel / Stimuli	Tâche	Brève description des résultats principaux
Hess & Polt, 1966	Goût	Jus d'orange (5 différents) Eau (5)	Mise en bouche	Dilatation pupillaire pour tous les stimuli Le diamètre pupillaire est fonction du jus d'orange mais pas de l'eau
Schneider et al., 2009	Odeur Trigéminnalité	Stimuli olfactifs : Rose (2 concentrations) Oeuf pourri Irritant trigéminal : CO ₂ (2 concentrations) Stimulus olfactif/irritant trigéminal : Citron	Olfaction	Dilatation pupillaire pour tous les stimuli La dilatation pupillaire peut être fonction de la modalité, CO ₂ (forte concentration) > Rose (forte concentration) mais pas de la concentration entre deux même stimuli (pour CO ₂ et Rose : hautes concentrations = basses concentrations) ni de la valence hédonique (Temps de réaction corrélé négativement avec intensité = Plus c'est intense, plus le temps de réaction (début de réaction et pic) est court)

2.5. Divers

Les changements pupillaires peuvent également être reliés au stress, à la douleur, à l'anxiété, à l'envie, au niveau d'intérêt etc. On peut citer par exemple une étude de Bitsios et al. (2004) qui mirent en évidence que notre pupille se dilate lors de l'anticipation d'une stimulation acoustique et encore plus lors de l'anticipation d'une stimulation électrique. L'anticipation a également un effet sur la réponse au moment de la stimulation, en effet, la pupille se dilate plus lorsque le sujet est en état de relaxation qu'en **état d'alerte**. De la même manière, la réaction pupillaire est plus importante pour la stimulation acoustique que pour la stimulation électrique en état d'alerte. Enfin, on observe une corrélation entre réduction de l'amplitude et augmentation de l'anxiété lors d'une stimulation électrique. Dans un registre proche, Höfle et al. (2008) ont constaté une dilatation pupillaire fonction d'une **douleur** induite. Egalement, beaucoup d'auteurs ont publié des études sur le **niveau d'intérêt**. Hess (1975) rapporta par exemple une dilatation pupillaire face à des plats alimentaires chez des sujets à jeun. Dans le même article il rapporte une étude dans laquelle la pupille ne dilate pas devant une image avec 1 œil ou 3 yeux alors qu'elle se dilate devant une image avec deux yeux et que cette dilation est d'autant plus importante que les pupilles des yeux observés sont grandes. Un peu plus tôt, Barlow (1969) mit en évidence que la dilatation de la pupille est corrélée au niveau d'intérêt, au moyen d'une expérience où il présentait à des sujets soit conservateurs, soit libéraux, des photos d'hommes politiques appartenant à leur parti ou au parti opposé. Les pupilles des blancs conservateurs se sont dilatées pour Wallace, un conservateur blanc et contractées pour Johnson et King, des libéraux respectivement blanc et noir et enfin, les pupilles des noirs libéraux se sont dilatées pour King et Johnson et contractées pour Wallace. Egalement, Bernhardt et al. (1996) ont montré que la pupille des femmes se dilataient plus que celles des hommes pour des peintures de scènes paisibles et à l'inverse que celles des hommes dilataient plus que celles des femmes pour des peintures de scènes de lutte (boxe).

Enfin, de manière indépendante, il a également été observé un effet des mouvements oculaires sur le diamètre pupillaire. Gagli, Hawelka & Hutzler (2011) ont en effet observé un changement de taille pupillaire pendant la lecture de phrase sans signification, ce qui suggère un effet du mouvement des yeux.

Les études de pupillométrie que nous avons passées en revue dans cette partie sont résumées dans le Tableau 21.

Tableau 21. Etudes de pupillométrie diverses

Références	Tâche	Brève description des résultats principaux
Barlow, 1969	Tâche d'observation Présentation de photos d'hommes politiques : George Wallace (conservateur blanc), Lyndon Johnson (libéral blanc), Martin Luther King (libéral noir) + Contrôle : Inconnu blanc 3 groupe des sujets : blancs conservateurs, blancs libéraux, noirs libéraux	La dilatation pupillaire est fonction de l'orientation politique, Blancs conservateurs : dilatent pour Wallace et contractent pour Johnson et King Blancs libéraux : dilatent pour King et Johnson et contractent pour Wallace Noirs libéraux : dilatent pour King et Johnson et contractent pour Wallace
Bitsios et al., 2004	Stimulation électrique ou acoustique 2 conditions : «détente» (pas d'anticipation) et «anticipation» Etude du réflexe pupillaire avant et après stimulation	La dilatation pupillaire est fonction de la condition et du type de stimulation, Diamètre pupillaire initial : relaxation < anticipation, anticipation (acoustique) < anticipation (électrique) Réflexe pupillaire : anticipation < relaxation, anticipation acoustique > anticipation électrique (Corrélation entre réduction de l'amplitude et augmentation de l'anxiété lors d'un choc électrique)
Bernhardt, et al. 1996	Tâche d'observation Présentation de peintures de George Bellows : scènes de boxe et scènes paisibles de paysages marins et de personnes engagées dans des activités "banales" = Lutte Vs Paix	La dilatation pupillaire est fonction de l'image, Femmes : images paisibles > Images de lutte Hommes : images paisibles < Images de lutte
Gagl, Hawelka & Hutzler, 2011	Tâche de compréhension pour tester mouvement des yeux Lecture de phrases puis au bout de 25% des phrases, questions de compréhensions avec sujets et œil artificiel	Dilatation pupillaire avec œil artificiel et pendant la lecture de la phrase sans signification ('z') significatif d'un effet mouvement des yeux
Höfle et al., 2008	Mesure du diamètre pupillaire durant l'induction d'une douleur (pression sur les doigts - 20 s). Au cours de l'induction de la douleur, les participants regardaient des photos.	Pic de dilatation équivalent selon le niveau de pression mais dilatation plus soutenue lors d'une pression plus forte
Hess, 1975	Tâche d'observation Présentation de photos de plats à des sujets rassasiés (repas 2h avant) et à des sujets ayant faim (pas mangé depuis 8h)	La dilatation pupillaire se produit pour charcuterie, roastbeef, rôti de dinde pour tous les sujets, pour spaghetti et steak/pomme de terre pour les sujets ayant faim La contraction pupillaire peut être fonction du rassasiement pour spaghetti et steak/pomme de terre, dilatation pour sujets ayant faim, contraction pour rassasiés

3. Les méthodologies actuellement utilisées en psychologie

3.1. Acquisition des données

3.1.1. Nombre de participants

Le nombre de participants rapporté dans les études de pupillométrie est variable. On a ainsi pu relever dans la littérature des études avec des effectifs allant d'un minimum de 10, à un maximum de 45 personnes. La moyenne observée était de 24 participants, la médiane de 21 participants (Tableau 23). Il est intéressant de noter que le nombre de participants peut largement varier en fonction de l'objectif. Par exemple, si l'étude s'attache uniquement à la réaction pupillaire, elle nécessitera moins de participants que si l'objectif est de corrélérer les données pupillométriques à des données déclaratives qui elles, nécessitent une taille de panel plus grande pour être exploitables. De la même manière, si l'étude consiste à étudier des populations (ex : malades Vs sains), le nombre de participants devra être adapté de manière à ce qu'il y ait suffisamment de participants dans une population pour que l'étude soit exploitable. Par exemple, si l'expérimentateur choisit de faire ses analyses avec 20 participants par modalité de facteur, un participant ne pouvant appartenir qu'à une modalité du facteur population, le nombre total de participants devra être multiplié par le nombre de modalités du facteur en question (ex : $\times 2$ dans le cas de malades (20) Vs Sains (20) = 40 au total).

3.1.2. Appareil et Conditions expérimentales

Des **appareils** de plus en plus performants pour la mesure du diamètre pupillaire apparaissent sur le marché. La règle millimétrée encore utilisée dans les années 1960 (Hess & Polt, 1966) a laissé la place à l'eye-tracker (oculomètre en français) et au pupillomètre. Le pupillomètre principalement utilisé en médecine pour l'examen pupillaire n'est pas vraiment adapté à la psychologie cognitive notamment car la mesure est effectuée quasiment au contact de l'œil (Figure 17). En revanche, l'eye-tracker permet des mesures plus libres avec des systèmes écran, déporté ou lunettes (Figure 18).



Figure 17. Mesure au pupillomètre



Figure 18. Exemples de différents systèmes d'eye-tracking de marque Tobii

La **technique** utilisée pour la mesure du diamètre pupillaire est celle du reflet cornéen. Elle consiste à envoyer des faisceaux de lumière infrarouge émis par un ensemble de diodes au centre de la pupille. Les reflets infrarouges renvoyés par la cornée de l'œil sont ensuite détectés et permettent, après calcul de connaître la position de fixation de l'œil sur une cible et le diamètre pupillaire.

Il existe différents **fabricants** d'eye-tracker, et différents modèles pour chaque fabricant. Les trois principaux fabricants sont SensoMotoric Instruments (**SMI**), Applied Science Laboratories (**ASL**) et Tobii Technology (**Tobii**), on retrouve principalement les deux premiers dans la littérature de psychologie. Les taux d'échantillonnages sont variables allant de 50Hz à 240Hz parfois même plus.

En terme de **conditions expérimentales**, les études de pupillométrie se déroulent en général dans une pièce fermée, isolée de la lumière du jour afin d'éviter les variations de lumière pouvant influencer sur le diamètre pupillaire. La luminosité constante de la pièce varie d'une étude à l'autre. A partir de nos observations, elle est en moyenne d'approximativement **200 lux** et peut varier de 2 lux à 500 lux. De la même manière, la luminance de l'écran et donc des stimuli peut également varier. D'après nos observations elle varie au moins de 7 à 50 cd/m² avec une moyenne autour de **30 cd/m²**.

Les **différents appareils** utilisés et les différentes **conditions expérimentales** fixées que nous avons passées en revue dans cette partie sont résumés dans le Tableau 22.

Tableau 22. Liste non exhaustive des différents appareils utilisés et des différentes conditions expérimentales fixées en pupillométrie

Références	Eye-tracker Marque	modèle	Fréquence	Salle	Stimulus
Bayer et al., 2011	SMI	Iview X Hi-Speed 1250	500	--	14,7cd/m ² 7,4cd/m ²
Bitsios et al., 2004	ASL	TVP 1015B	60	noire	--
Borneman et al., 2010	SMI	Iview X Hi-Speed	240	500 lux	49 48.5 34.5 cd/m ²
Bradley et al., 2008	ASL	model 504	60	faiblement éclairé	--
Causse et al., 2010	SMI	Iview X RED	50	450 lux	--
Conway et al., 2008	ASL	ASL 5000	60	--	--
Dietz et al., 2011	ASL	Eye-Trac 6000	60	--	--
Dufresne et al., 2010	Tobii	X120	120	--	--
Gabay et al., 2011	SR Research	EyeLink 1000	250	faiblement éclairé	--
Gagl et al., 2011	SR Research	EyeLink 1000	1000	100 lux	8 cd/m ²
Geangu et al., 2011	Tobii	2150	50	15.10 lux 15.30 lux 15.40 lux - 13.10 lux	--
Höfle et al., 2008	SMI	Iview X	238	37 lux	--
Iqbal et al., 2004	SR Research	EyeLink II	250	--	--
Jackson & Sirois, 2009	Tobii	X50	50	9.3lux 9.5 lux 2.7 lux	--
Jainta & Baccino, 2010	PlusoptiX	PowerRef II	25	2-15 lux	30cd/m ²
Johansson et al., 2011	SMI	Iview X Hi-Speed	1250	--	--
Klingner et al., 2008	Tobii	1750	50	--	--
Kuchincky et al., 2013	AR	PC-60 ViewPoint	60	160 lux	--
Kuchinke et al., 2007	SMI	Iview X Hi-Speed	240	500 lux	--
Kuchinke et al., 2011	SMI	Iview X Hi-Speed	240	500 lux	--
Laeng & Falkenberg, 2007	SMI	Iview X RED	50-60	--	--
Otero, et al., 2011	SR Research	EyeLink II	--	--	--
Palinko et al., 2010	Tobii	1750	50	--	--
Partala & Surakka, 2003	ASL	series 4000	50	--	--
Piquado, Isaacowitch & Wingfield, 2010	ASL	Model 6 series	60	--	--
Prehn, et al., 2011	SMI	Iview X RED	50	500 lux	24.64cd/m ²
Raisig et al., 2007	SMI	Iview X	50	300 lux	30
Raisig et al., 2010	SMI	Iview X Hi-Speed	240	300 lux	--
Rieger & Savin-Williams, 2012	SR Research	--	--	--	--

Schneider et al., 2009	AMTech	Compact Pupillograph (CIP)	Integrated	--	--
Siegle et al., 2001	Micromeasurements	1200	60	486 lux	--
Siegle et al., 2003	ISCAN	RK 406	60	--	--
Stone et al., 2003	AR	PC-60 ViewPoint	60	24 lux 58lux	--
Ullwer et al., 2009	SMI	Iview	240	--	--
Verney, et al., 2001	Micromeasurements	1200	60	486 lux	--
Võ et al., 2008	SMI	Iview X Hi-Speed	250	500 lux	--

SMI : SensoMotoric Instruments

ASL : Applied Science Laboratories

AR : Arrington Research Inc

CIP : Compact Integrated Pupillograph

3.2. Pré-traitements des données

Il est la plupart du temps nécessaire, avant de traiter les données, d'effectuer un prétraitement. Cela inclut le remplacement des valeurs manquantes, le lissage et la correction de la ligne de base (valeur initiale).

3.2.1. Remplacement des valeurs manquantes

Quel que soit l'appareil utilisé, la perte de données lors de mesures du diamètre pupillaire est inévitable. La raison principale est le clignement des yeux. En effet, même si certains expérimentateurs imposent à leurs sujets de ne pas cligner des yeux pendant les mesures (ex : Dietz et al., 2011 ; Kuchinke et al., 2011 ; Raisig et al., 2007), cela peut être parfois difficile à réprimer pour certains sujets. D'autres expérimentateurs n'imposent pas au sujet de garder les yeux bien ouverts ce qui entraîne inévitablement des pertes de données. Selon l'appareil utilisé, ces données perdues peuvent se présenter de différentes manières. Pour citer un exemple, avec l'utilisation des appareils Tobii, le logiciel de contrôle Tobii Studio est le plus souvent utilisé. Celui-ci applique la valeur '-1' à chaque mesure échouée. Lorsque les données perdues ne sont pas trop importantes, il est possible de les estimer. La méthode la plus répandue est l'interpolation linéaire (Kuchinke et al., 2007 ; 2011 ; Raisig et al. 2007 ; 2010 ; Dietz et al. 2011 ; Kuchinsky et al., 2013 ; Bradley et al. 2008 ; Borneman et al. 2010 ; Jainta & Baccino, 2010). Parfois les auteurs ne choisissent l'interpolation linéaire que lors d'une perte de données pour les deux yeux. Lors de la perte sur un seul œil, c'est l'autre œil qui est utilisé pour interpolation (Geangu et al., 2011 ; Jackson & Sirois 2009). D'autre fois, la dernière valeur valide est utilisée (Partala & Surakka, 2003). Enfin, lorsqu'il y a trop de valeurs manquantes, les données sont la plupart du temps écartées.

3.2.2. Lissage

Il est fréquent en traitement du signal de lisser les données. Cela permet de supprimer le bruit. Le bruit étant aléatoire, on s'attend à ce qu'il change d'un point à l'autre. Si le signal a des variations lentes devant le pas d'échantillonnage, alors un lissage de la courbe peut permettre de conserver les caractéristiques du signal tout en réduisant le bruit. Souvent, en pupillométrie, les auteurs font le choix d'effectuer ce lissage. Et majoritairement, le lissage choisi est la moyenne mobile avec une fenêtre de temps moyenne de 167ms (Kuchinke et al., 2011 ; Raisig et al., 2007, 2010 ; Kuchinsky et al., 2013 ; Prehn et al., 2011 ; Geangu et al., 2011 ; Jackson & Sirois, 2009).

3.2.3. Correction de la ligne de base

Enfin la dernière étape consiste à corriger la ligne de base. Cela consiste à soustraire à toutes les valeurs, une valeur de référence pour retirer d'une part, la variabilité interindividuelle en terme de taille de pupille mais également un éventuel résidu de réaction. Cela permet de connaître la valeur absolue du

changement de diamètre pupillaire par rapport à un temps t_0 correspondant au début du stimulus. Les corrections de ligne de base choisies par les auteurs varient. Dans la majorité des cas, cette valeur de référence correspond à la moyenne d'une fenêtre de temps plus ou moins grande avant le début du stimulus. Globalement, cette fenêtre varie de 150ms (Raisig et al., 2007) à 1 (Dietz et al., 2011 ; Kuchinsky et al., 2013 ; Partala & Surakka, 2003 ; Höfle et al., 2008 ; Ullwer et al., 2009 ; Geangu et al., 2011) ou 2s (Honma et al., 2012). Il arrive que les auteurs fassent le choix de soustraire la moyenne de l'essai (Jainta & Baccino, 2010). Dans ce cas-là, seule la variabilité interindividuelle en terme de taille de pupille est retirée.

Les **principaux pré-traitements utilisés** en pupillométrie que nous avons passés en revue dans cette partie sont résumés dans le Tableau 23.

Tableau 23. Liste non exhaustive des différentes tailles de panel (n) et des principaux pré-traitements utilisés en pupillométrie

Ref	n	Lissage	Remplacement des valeurs manquantes	Ligne de base
Borneman et al. 2010	34	--	Si perte de données excessive, suppression de l'essai Si « petits blancs », interpolation linéaire	200 ms
Bradley et al. 2008	27	--	Interpolation linéaire	1 s
Conway et al. 2008	12 10 20	--	Si trop d'artéfacts, suppression de l'essai	--
Dietz et al. 2011	15 15	--	Interpolation linéaire	1 s
Geangu et al. 2011	15 15	Découpage avec un ratio fréquence de 12.5 (250ms)	Si donnée manquante sur un œil, utilisation de l'autre œil pour interpolation Si données manquantes sur les deux yeux : interpolation linéaire (3avant / 3après)	1 s
Höfle et al. 2008	20	--	Données manquantes supprimées Artéfacts également supprimés (valeur de pupille plus grande ou plus petite que $M \pm 3SD$)	1 s
Honma et al. 2012	42	--	--	2 s
Jackson & Sirois 2009	24	Découpage avec un ratio fréquence de 12.5 (250ms)	Si donnée manquante sur un œil, utilisation de l'autre œil pour interpolation Si données manquantes sur les deux yeux, interpolation linéaire (3avant / 3après)	--
Jainta & Baccino 2010	10	--	Si perte de données excessive (≥ 3 « blancs »), suppression de l'essai 1 « blanc » = diamètre pupillaire inférieur à 60% de la taille médiane pendant au moins 50 ms, « blancs » séparés par moins de 100ms agrégés et comptés comme un « blanc » si peu de perte de données (< 3 « blancs »), interpolation linéaire	Moyenne de l'essai
Kuchinke et al. 2007	26	Moyenne mobile sur 7-points (116.67 ms)	Si perte de données excessive, suppression de l'essai Si petits artéfacts, interpolation linéaire	200 ms

Ref	n	Lissage	Remplacement des valeurs manquantes	Ligne de base
Kuchinke et al. 2011	19 21	Moyenne mobile sur 7-points (116.67 ms)	Interpolation (lorsqu'elle est possible)	200 ms
Kuchinsky et al. 2013	19	Moyenne mobile sur 5-points (83.35 ms)	Interpolation linéaire Si plus de 50% de données nécessitent une interpolation, suppression de l'essai	1000 ms
Laeng & Falkenber 2007	14	--	--	--
Otero et al. 2011	45	--	Aucun essai perdu grâce à des moyennes sur 50 essais	--
	44		--	250 ms (max)
	37		--	--
Partala & Surakka 2003	31	--	Blancs et artéfacts (brèves augmentation/diminution (au moins 0.375 mm en 20 ms)) supprimés	1 s
Prehn et al. 2011	30	Moyenne mobile sur 7-points (140 ms)	Si perte de données excessive ou mouvements des yeux, suppression de l'essai Si peu de perte de données, interpolation linéaire	200 ms
Raisig et al. 2007	27	Moyenne mobile sur 10-points (200 ms)	Interpolation (lorsqu'elle est possible)	150 ms
Raisig et al. 2010	30			200 ms
Ullwer et al. 2009	37	--	--	1 s
Võ et al. 2008	19	--	Si observation de grand(s) changement(s) de taille de pupille (jugé comme un artéfact(s)), suppression de l'essai	200 ms
Wierda et al. 2012	20	--	Données segmentées (un segment = 4300ms) Si perte de données dans un segment, suppression du segment	200 ms
MOYENNE	24	169.59 ms (calculée à partir des références qui mentionnent l'utilisation d'une ligne de base)		
MEDIANE	21			
MAX	45			
MIN	10			

3.3. Traitement des données

3.3.1. Fenêtre de temps

La fenêtre de temps choisie pour le traitement des données peut avoir une grande importance dans l'interprétation des résultats. Aussi, il est important de rappeler que le temps de latence de la réaction de la pupille est compris entre 200 et 250 ms (Rougier & Riss, 2000). La fin d'une réaction de dilatation pupillaire arrive souvent vers 1 à 2s (d'après les observations de la littérature et nos propres données). Il est donc bien sûr important de choisir une fenêtre au-delà de 250 ms mais surtout d'aller au-delà de la fin de réaction, soit au moins jusqu'à 1s après stimulus. Ainsi, on retrouve dans la littérature des fenêtres de temps allant de 1s (Borneman et al., 2010 ; Honma et al. 2012) à 25s (Geangu et al. 2011). En moyenne, elle est d'un peu plus de 6s.

3.3.2. Variable(s) étudiée(s)

Pour l'application des traitements statistiques, et afin de pouvoir conclure sur l'effet des stimuli sur le diamètre pupillaire, il est essentiel de définir une ou plusieurs variable(s). La variable privilégiée par les auteurs est la hauteur du **pic de dilatation**, aussi appelé **amplitude**. Le pic est défini de différentes manières selon les auteurs. La plupart du temps il est défini comme la valeur maximale dans la fenêtre de temps étudiée (Kuchinke et al., 2007 ; Raisig et al., 2007 ; Vö et al., 2008 ; Jackson & Sirois, 2009 ; Ullwer et al., 2009 ; Borneman et al., 2010 ; Prehn et al., 2011 ; Kuchinsky et al., 2013). Mais il peut également être défini comme la moyenne d'une période identifiée (Höfle et al., 2008). Egalement, cette amplitude peut être celle de la **contraction** pour des stimuli lumineux comme dans l'étude de Conway et al. (2008) dans laquelle la contraction correspond à la soustraction du début du signal à la fin du signal (100 ms début – 100ms fin). D'autres auteurs choisissent de travailler sur le **diamètre moyen** (Partala & Surakka, 2003 ; Ullwer et al., 2009 ; Jainta & Baccino, 2010 ; Kuchinke et al., 2011 ; Kuchinsky et al., 2013), **l'aire sous la courbe** (Kuchinke et al., 2011) ou un **ratio** tel que le diamètre pupillaire moyen pour une condition sur le diamètre pupillaire moyen du sujet (Laeng & Flakenberg, 2007 ; Otero et al., 2011) ou une valeur finale sur une valeur initiale (Otero et al., 2011). Un autre paramètre mérite d'être cité puisqu'on le retrouve à plusieurs reprises dans la littérature, il s'agit du **temps de latence**, temps entre le stimulus et le début de la réaction pupillaire (Conway et al., 2008 ; Prehn et al., 2011 ; Kuchinsky et al., 2013). A noter que le **signal du diamètre pupillaire moyen en fonction du temps**, même s'il n'est pas toujours exploité statistiquement en tant que tel comme l'ont fait par exemple Kuchinke et al. (2007 ; 2011), Bradley et al. (2008) ou encore Jainta & Baccino (2010) et Raisig et al. (2007), est quasi-systématiquement utilisé pour le tracé de l'évolution de la réaction pupillaire dans le temps. Enfin, le choix n'est que rarement restreint à une seule variable et beaucoup d'auteurs comme nous avons pu le constater, font le choix d'interpréter leurs données à partir de plusieurs variables (ex : Kuchinsky et al. (2013) ont choisi d'étudier le diamètre moyen, l'amplitude et le temps de latence).

3.3.3. Tests statistiques

Les tests statistiques utilisés dépendent bien évidemment de la/ des variable(s) choisie(s). S'il s'agit d'une variable par observation alors le plus souvent l'analyse de la variance (**ANOVA**) est privilégiée puis complétée par un **t-test** lors de l'observation d'effets principaux. Plus ponctuellement on retrouve des études de corrélation ou encore des analyses **multivariées** telles que l'**analyse en composantes principales (ACP)** (Kuchinke et al., 2007 ; Raisig et al., 2007 ; Jainta & Baccino, 2010) ou l'**analyse en composantes indépendantes (ACI)** (Jainta & Baccino, 2010) qui permettent de réaliser une analyse prenant en compte l'ensemble des temps et non un paramètre défini. Autre moyen de considérer l'ensemble des temps, les ANOVAs consécutives qui consistent à considérer consécutivement la valeur à un temps t comme variable ou comme Kuchinke et al. (2011) la valeur moyenne d'une fenêtre de temps. Enfin, on retrouve également l'**analyse fonctionnelle** (Jackson & Sirois, 2009), les analyses de **régression** (logarithmique et linéaire) (Honma et al., 2012), l'analyse de courbes de croissance (**Growth Curve Analysis**, GCA) et récemment la technique de **déconvolution** (Wierda et al., 2012).

3.3.4. Représentation graphique

La quasi-totalité des études reportent en premier lieu dans leurs résultats, la **courbe d'évolution du diamètre pupillaire**. Seuls l'unité ou la fenêtre de temps reportée varient. Ensuite, on retrouve fréquemment l'**histogramme en barres** ou autre graphique similaire qui permet de représenter la/les variable(s) préalablement définie(s) par condition.

Les **différentes méthodologies** utilisées dans les études de pupillométrie que nous avons passées en revue dans cette partie sont résumées dans le Tableau 24.

Tableau 24. Liste non exhaustive des principaux traitements utilisés en pupillométrie

Ref	Fenêtre(s) de temps	Variable(s) étudiée(s) hors variables temporelles	Test(s) statistique(s)	Graphique(s)
Borneman et al., 2010	0 - 1000 ms	Pic de dilatation	Corrélation (Pearson) ANOVA	Courbes
Bradley et al., 2008	2000 - 6000 ms (0-2s : réflexe photomoteur due à l'image)	Diamètre pupillaire moyen	Statistiques multivariables	Courbes Graphique nuage de points (Diamètre pupillaire moyen par condition)
Conway et al., 2008	0 - 4000 ms	Variation du diamètre pupillaire : 100ms début - 100ms fin (correspond à une contraction car le stimulus est une image) Temps de latence	ANOVA t-tests	Courbes Graphique en barres (Contraction moyenne par condition)
Dietz et al., 2011	0 - 6000 ms	Variation moyenne du diamètre pupillaire de 2.5 s à 6 s par rapport au pic de contraction du réflexe photomoteur (max contraction 0 - 2 s)	MANOVA t-tests Corrélations Spearman	Courbes
Geangu et al., 2011	0 - 25 s	Diamètre pupillaire moyen après réflexe photomoteur (2–25 s)	ANOVA t-test fonctions spline	Courbes
Höfle et al., 2008	0 - 20 s	Moyennes d'« époques » (1s) Pic de dilatation (Moyenne de la deuxième "époque")	ANOVA Correlation	Courbes (Une moyenne par seconde (époque))
Honma et al., 2012	1000 ms avant - 1000 ms après	Diamètre pupillaire moyen	ANOVA Comparaisons multiples t-test Welch's Analyses de régression (logarithmique et linéaire) ANCOVA Corrélation (Pearson's)	Graphique en barres (diamètre pupillaire moyen par condition)
Jackson & Sirois, 2009	0 - 24 s	Pic de dilatation	Analyse fonctionnelle B-spline ANOVA t-tests Corrélation	Courbes

Jainta & Baccino, 2010	0 - 5000 ms	Diamètre pupillaire moyen	ANOVA t-tests ACP ACI	Courbes Graphique en barres (diamètre pupillaire moyen par condition)
Kuchinke et al., 2007	0 - 1500 ms	Pic de dilatation	rmANOVA ACP + rmANOVA	Courbes
Kuchinke et al., 2011	0 - 3500 ms	Diamètre pupillaire moyen Aire sous la courbe	ANOVA t-tests ANOVAs consécutives pour chaque fenêtre de 50ms	Courbes
Kuchinsky et al., 2013	0 - 1883.71 ms ou 0 - 1500 ms	Diamètre pupillaire moyen Pic de dilatation Temps de latence	Analyse de la courbe croissante (traduit de Growth Curve analysis - GCA) ANOVA Corrélation	Courbes
Laeng & Falkenberg, 2007	0 - 10 s	Variation pupillaire moyenne correspondant au ratio : valeur pupillaire moyenne pour chaque condition/diamètre pupillaire moyen global de chaque participant	ANOVA	Graphique (variation moyenne du diamètre pupillaire par condition)
Otero et al., 2011	0 - 10 s	Variation pupillaire moyenne correspondant au ratio : valeur pupillaire moyenne pour chaque condition/diamètre pupillaire moyenne global de chaque participant	ANOVA	Graphique (variation moyenne du diamètre pupillaire par condition)
	0 - 2000 ms	Ratio de dilatation correspondant à: max taille pupille des dernières 1750 ms/max taille pupille des premières 250 ms	t-test	Graphique en barres (Ratio de dilatation moyen par condition)
	0 - 4000 ms	Ratio de dilatation correspondant à: max taille pupille des dernières 3500 ms/ max taille pupille des 250 ms avant stimulus	ANOVA t-tests	
Partala & Surakka, 2003	0 - 6000 ms et 6000 - 8000 ms	Diamètre pupillaire moyen de 0 à 6s (stimulus) Diamètre pupillaire moyen de 6 à 8s (après stimulus)	ANOVA t-tests	Courbes Graphique en barres (variation moyenne du diamètre pupillaire par condition (0-6s))

Prehn et al., 2011	0 - 3500 ms	Pic de dilatation (max 0.5 - 3.5 s) Temps de latence	ANOVA t-tests	Courbes Graphique en barres (pic de dilatation par condition)
Raisig et al., 2007	0 - 5000 ms	Pic de dilatation	ACP + rotation varimax	
Raisig et al., 2010	-1000 ms - 6500 ms (courbes) 3200 - 4800 ms (tests statistiques)	Diamètre pupillaire moyen	ANOVA t-tests	Courbes
Ullwer et al., 2009	variable (jusqu'à ce qu'il y ait une réponse)	Diamètre pupillaire moyen Pic de dilatation	ANOVA	Graphique en barres (dilatation pupillaire par condition)
Võ et al., 2008	0 - 1800 ms	Pic de dilatation	ANOVA	Courbes
Wierda et al., 2012	0 - 4300 ms	"Impulsions attentionnelles" ("attentional pulses)	Deconvolution	Courbes "Impulsions d'attention déconvoluées" (« Deconvolved attentional pulses »)

4. Synthèse

Selon la lumière ambiante, les pupilles se dilatent (mydriase) ou se contractent (myosis), c'est le réflexe photomoteur. Mais les variations pupillaires peuvent également être provoquées par des stimuli cognitifs ou émotionnels. Les réponses psychosensorielles sont exclusivement contrôlées par le système sympathique contrairement au réflexe photomoteur qui est à la fois contrôlé par le système sympathique et parasympathique. Principalement depuis les années 1960, de nombreuses études se sont intéressées à l'effet de ces stimuli sur le diamètre pupillaire. Ces études n'ont pas pour objectif d'étudier les mécanismes physiologiques des mouvements de la pupille en tant que tels. Au lieu de cela, les réactions sont utilisées comme outils de recherche pour mieux appréhender les phénomènes psychologiques chez l'homme. Le Tableau 25 synthétise les principales observations qui ont pu être faites depuis ces années 1960.

Tableau 25. Récapitulatif des différents stimuli reliés aux changements pupillaires

CHARGE COGNITIVE	LA PUPILLE REFLÈTE LA QUANTITÉ DE RESSOURCES ALLOUÉES
<ul style="list-style-type: none"> • Raisonnement • Langage • Mémoire • Perception 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus la tâche est difficile, plus la pupille dilate (ex : multiplication > Addition) • Plus une tâche linguistique est complexe, plus la pupille dilate (ex : s'exprimer dans une langue qui n'est pas la sienne) • Plus il y a de choses à mémoriser, plus la pupille dilate (ex : 7 chiffres > 3 chiffres) • Plus la perception d'un stimulus est gênée, plus la pupille dilate
MEMOIRE	LA PUPILLE REFLÈTE LA QUALITÉ DE LA TRACE MNÉSIQUE
<ul style="list-style-type: none"> • Nouveauté • Encodage mnésique • Familiarité • Violation des attentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Lors d'une tâche de reconnaissance, la pupille se dilate plus pour des éléments déjà présentés • Lors d'une tâche de reconnaissance, la pupille se dilate plus pour des éléments plus profondément encodés • Lors de l'encodage, la pupille se dilate plus face à la nouveauté • La violation des attentes (ex : violation temporelle) entraîne une dilatation de la pupille
STIMULI EMOTIONNELS	LA PUPILLE REFLÈTE L'ÉTAT ÉMOTIONNEL
<ul style="list-style-type: none"> • Excitation sexuelle • Divers • Compréhension de maladies 	<ul style="list-style-type: none"> • L'excitation du sujet provoque la dilatation de ses pupilles (ex : présentation de photos de personnes nues) • Des images, mots ou sons émotionnels, qu'ils soient positifs ou négatifs, entraînent une dilatation de la pupille (positifs, négatifs > neutre) • La pupille peut permettre de mieux comprendre les troubles émotionnels de certains malades
STIMULI GUSTATIFS/OLFACTIFS	MÉCONNU
<ul style="list-style-type: none"> • Gustatifs • Olfactifs 	<ul style="list-style-type: none"> • Réponse pupillaire différente selon produits (mais une seule étude) • Différences entre les modalités de stimulus et la force de ces stimuli, mais non liées à la valence hédonique (une seule étude aussi)
DIVERS	LA PUPILLE REFLÈTE L'INTENSITÉ D'UN RESENTI
<ul style="list-style-type: none"> • Stress/Anxiété/Alerte • Intérêt • Douleur • Envie 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus le sujet est stressé/anxieux, plus sa pupille se dilate (anticipation d'une stimulation électrique) • Plus le sujet a de l'intérêt pour le stimulus, plus ses pupilles se dilatent (ex : Images paisibles : Femmes > Hommes, Images de lutte (boxe) : Hommes > Femmes) • La douleur fait dilater la pupille (ex : pression sur le doigt plus ou moins forte) • Plus le stimulus suscite d'envie, plus la pupille dilate (ex : sujets ayant faim devant photos de plats alimentaires)

PROBLÉMATIQUE

1. Contexte

1.1. L'objectif général

La revue de la littérature a permis de souligner que notre perception sensorielle des aliments ainsi que notre jugement hédonique étaient soumis à un grand nombre d'influences. Ces influences peuvent aussi bien venir d'une interaction entre nos différents sens ou bien du contexte qu'il soit mnésique ou émotionnel. Dans cette thèse, nous nous sommes plus particulièrement intéressés au contexte émotionnel et à l'impact que celui-ci peut avoir sur notre jugement hédonique. L'objectif principal était de répondre à la question : « **Dans le contexte alimentaire, quel est le pouvoir émotionnel du produit, du contexte/de l'ambiance et de ces deux éléments combinés ?** ». Pour cela, la pupillométrie a été utilisée comme outil de mesure des émotions. Nous avons ensuite tenté de répondre à une seconde question, « **Quel est l'impact de ces émotions sur le jugement hédonique ?** ». Pour cela, nous avons étudié l'évaluation hédonique de produits seuls ou en contexte.

1.2. Les hypothèses théoriques

Pour étudier l'influence des émotions dans le contexte alimentaire, nous avons choisi de travailler sur trois modalités. Tout d'abord sur les modalités gustative et olfactive en travaillant respectivement sur le produit alimentaire lui-même et sur son odeur. Et également sur la modalité auditive en travaillant avec des ambiances et des musiques conduisant à la création d'un contexte de consommation respectivement, soit congruent ou non congruent, soit positif ou négatif.

1.2.1. Les stimuli gustatifs

Nous avons vu lors du premier chapitre de la revue de la littérature qu'au cœur de toute influence se trouvait la mémoire. Aussi, selon le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002), les traces étant multidimensionnelles, lors de la présentation d'un stimulus gustatif, toutes les dimensions sensorielles, motrices et émotionnelles associées à ce stimulus vont être activées. On peut donc penser que chaque sujet, s'il a déjà rencontré ce produit, n'activera pas que la dimension sensorielle gustative, mais toutes les dimensions sensorielles ainsi que les dimensions motrices et surtout ce qui nous intéresse ici, émotionnelles, associées au produit. On a vu que chaque expérience est toujours associée à des états du corps plus ou moins agréables et désagréables, et le système mnésique doit en garder une trace. Aussi s'il a déjà rencontré ce produit, sous une forme ou une autre, son état émotionnel en sera impacté. Notre objectif sera dans un premier temps d'appréhender cet état émotionnel.

1.2.2. Les stimuli olfactifs

Si on suit le raisonnement de Versace, Nevers & Padovan (2002), on peut penser qu'un stimulus olfactif, par l'activation notamment de toutes les dimensions sensorielles, entraînera la même réponse qu'un stimulus gustatif associé au même produit en activant les mêmes aspects émotionnels.

Cependant, de nombreuses données de la littérature ont montré que les stimuli olfactifs réactivaient plus efficacement les souvenirs autobiographiques que les autres modalités sensorielles (Chu & Downes, 2000). Selon notre hypothèse, les modalités gustative et olfactive d'un produit réactiveront chacune les dimensions sensorielles, motrices et émotionnelles associées au produit mais la modalité olfactive permettra un meilleur accès aux dimensions émotionnelles. Le pouvoir émotionnel du stimulus olfactif serait alors plus fort. La mesure du diamètre pupillaire pour des stimuli olfactifs devrait nous permettre de vérifier cette hypothèse.

1.2.3. Les stimuli auditifs

Des stimuli auditifs ont été utilisés pour la création de contexte. Nous avons d'une part travaillé avec des ambiances. Celles-ci associaient musique, bruitage, etc. Elles étaient construites de manière à être congruentes ou non congruentes aux produits testés. Ces ambiances ont été diffusées en amont des stimuli gustatifs comme amorce contextuelle. Elles ont également été diffusées après le produit afin de tester l'impact émotionnel d'une amorce produit sur ces ambiances. D'autre part, nous avons travaillé avec des musiques. Celles-ci, étaient choisies sujet par sujet afin d'être soit appréciées, soit non appréciées. Elles ont été utilisées comme vecteurs d'émotions positives ou négatives. Ces musiques ont été diffusées avant et pendant chaque stimulus gustatif. Dans le premier cas, nous traitons des ambiances évocatrices mais impersonnelles. Le sujet pourra connaître l'ambiance sans y associer d'expérience agréable ou désagréable. On s'attend donc à observer un impact émotionnel moyen. En revanche, dans le second cas, les musiques étant choisies en fonction du sujet, elles lui rappelleront forcément des souvenirs. On s'attend alors à provoquer plus d'émotions. Notre hypothèse sera une nouvelle fois à vérifier par la mesure du diamètre pupillaire.

1.2.4. Multimodalité – impact sur l'état émotionnel et la réponse hédonique

Enfin, on a cherché à s'intéresser à l'impact d'une stimulation multimodale sur l'état émotionnel et la réponse hédonique par la présentation en simultané de 2 stimuli de modalités différentes. Tout d'abord, chaque stimulus activant des traces multidimensionnelles, on pourrait alors imaginer que lors de la présentation de différents stimuli, par exemple, une odeur et une musique, l'état émotionnel soit doublement impacté. Les émotions provoquées par l'odeur et la musique s'additionneraient. C'est l'hypothèse que nous allons dans un premier temps tenter de vérifier. Egalement, toujours lors de la présentation de différents stimuli, on peut imaginer que les traits émotionnels activés par un stimulus (ex : une musique) puissent avoir un impact sur la perception hédonique d'un autre stimulus (ex : un produit). C'est ce que l'on cherchera à vérifier en comparant la notation hédonique de produits ou d'odeurs seuls ou en contexte.

2. La démarche méthodologique

2.1. Développement de l'outil

Le chapitre 2 de la revue de la littérature a permis de mettre en lumière le potentiel de la pupillométrie comme mesure objective notamment pour les émotions. Cependant, il a également mis en évidence l'absence d'une méthodologie unique, standard. Aussi, la première étape de ce travail de thèse a été de développer une méthodologie de pupillométrie dans l'optique d'une application **en situation de dégustation** en prenant en compte les contraintes inhérentes à cette situation particulière. En réalité, ce développement s'est fait tout au long de la thèse ce qui a permis le recueil de nombreuses précautions à prendre dans ce cas particulier qu'est la dégustation. La question sous-jacente à cette première étape était : **Quelles sont les précautions à prendre et les traitements à effectuer pour une étude de pupillométrie en situation de dégustation ?**

2.2. Recherche des effets des stimuli chimiosensoriels sur le diamètre pupillaire

Avant d'évaluer le potentiel de la pupillométrie pour discriminer des produits en termes de préférences et/ou charge émotionnelle, il apparaît indispensable de savoir si les caractéristiques chimio-sensorielles propres à chaque produit ne sont pas elles-mêmes déjà responsables d'une réaction pupillaire. La deuxième étape de cette thèse a consisté à rechercher systématiquement les possibles effets des 5 saveurs de base et, en vue de futures applications dans le domaine des vins et spiritueux, des principales caractéristiques chimio-sensorielles variables dans les boissons alcoolisées. Elle cherchait ainsi à répondre à la question : **Les principales caractéristiques chimio-sensorielles des produits alimentaires ont-elles une influence sur le diamètre pupillaire ?**

2.3. Emotions, stimuli gustatifs et contexte

La troisième étape de ce travail de thèse a été de mesurer le pouvoir émotionnel de stimuli gustatifs, seuls ou en contexte. Pour cela, trois expérimentations ont été mises en place. Pour la première, nous avons travaillé avec des stimuli gustatifs seuls. Pour la seconde expérimentation, aux stimuli gustatifs ont été ajoutés des stimuli auditifs. Ces stimuli auditifs étaient des ambiances qui étaient soit congruentes, soit non congruentes avec les produits testés. Enfin, pour la dernière expérimentation, aux stimuli gustatifs ont une nouvelle fois été ajoutés des stimuli auditifs mais cette fois-ci, il s'agissait de musiques. Ces musiques étaient soit appréciées par le sujet, soit non appréciées, ce qui a permis la création d'un contexte émotionnel positif ou négatif.

Le premier objectif était d'appréhender le pouvoir émotionnel de chaque élément seul (stimulus gustatif, olfactif ou auditif) par la mesure du diamètre pupillaire. Ensuite l'impact de la présentation simultanée de 2 stimuli de modalités différentes sur l'état émotionnel du sujet d'une part, et sur la notation hédonique d'autre part a été observé.

2.4. Emotions, stimuli olfactifs et contexte

La dernière étape de ce travail de thèse a été de mesurer le pouvoir émotionnel de stimuli olfactifs, seuls ou en contexte. Pour cela, une expérimentation semblable à la seconde expérimentation conduite avec des stimuli gustatifs a été mise en place. Seuls les stimuli gustatifs ont été remplacés par des stimuli olfactifs.

De la même manière que précédemment, dans un premier temps, le pouvoir émotionnel des 2 stimuli seuls a été appréhendé. Puis l'impact de la présentation simultanée des 2 types de stimuli de modalités différentes sur l'état émotionnel du sujet d'une part, et sur la notation hédonique et le temps de réponse à la question « Aimez-vous cette odeur ? » d'autre part a été observé.

La Figure 19 synthétise les différentes étapes de la démarche méthodologique.

CHAPITRE 3

Etape n°1 : Développement d'une méthodologie de pupillométrie en situation de dégustation

- Quelles sont les précautions à prendre pour une étude de pupillométrie en situation de dégustation ?
- Quel pré-traitement doit être appliqué afin d'exploiter les données ?
- Quel(s) traitement(s) de données appliquer pour répondre à nos questions ?

CHAPITRE 4

Etape n°2 : Recherche systématique des possibles effets des principales caractéristiques chimio-sensorielles des produits alimentaires.

- Recherche des possibles effets des 5 saveurs de base
- Recherche des possibles effets des principales sensations spécifiques des boissons alcoolisées

CHAPITRE 5

Etape n°3 : Evaluation du pouvoir émotionnel des stimuli gustatifs

- Pouvoir émotionnel de stimuli gustatifs seuls (Expérience 1)
- Pouvoir émotionnel de stimuli gustatifs seuls, d'un contexte mnésique (congruent vs non congruent) et de la combinaison de ces deux éléments (Expérience 2)
- Pouvoir émotionnel de stimuli gustatifs seuls, d'un contexte émotionnel (agréable vs désagréable) et de la combinaison de ces deux éléments

CHAPITRE 6

Etape n°4 : Evaluation du pouvoir émotionnel des stimuli olfactifs

- Pouvoir émotionnel de stimuli olfactifs seuls, d'un contexte mnésique (congruent vs non congruent) et de la combinaison de ces deux éléments
- Impact du contexte mnésique sur l'appréciation hédonique et le temps de réponse à la question « Aimez-vous cette odeur ? »

Figure 19. Résumé des différentes étapes de la démarche méthodologique

PARTIE 2 : TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX

CHAPITRE 3 : PUPILLOMÉTRIE EN SITUATION DE DÉGUSTATION – DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE

1. Acquisition des données

1.1. Participants

Dans une étude de pupillométrie, comme dans toute étude, un des premiers paramètres qu’il apparaît important de fixer est le **nombre de participants**. Comme on l’a vu précédemment, ce nombre est variable dans la littérature pouvant aller de 10 à 45 participants avec une moyenne de 24 et enfin une médiane de 21 participants. Partant de cette observation, il semblerait qu’un nombre de 20 à 25 participants soit adéquat pour ce type de test. Pour renforcer cette observation, nous avons réalisé un test de puissance sur la base de nos données collectées. On a ainsi mis en évidence qu’afin d’obtenir une puissance de test de 90% avec $\alpha = 0,05$, un nombre moyen de 23 participants serait nécessaire pour la détection d’une dilatation de pupille d’environ 0.09mm correspondant à un pourcentage de variation de 2.4%. En se basant sur ces observations, nous recommandons un minimum de **23 participants** pour une étude de pupillométrie.

Ensuite, il est important de noter que certaines caractéristiques du sujet peuvent être un motif d’exclusion. Cela peut-être la taille de pupille (trop large, trop petite), un strabisme, un recours à la chirurgie de l’œil (ex : chirurgie de la myopie), etc. En effet, ces caractéristiques peuvent entraîner la perte de données (l’appareil capte mal le signal) et ainsi une qualité médiocre des enregistrements. Il peut donc être intéressant de **pré-sélectionner les sujets** pour exclure en amont ces sujets particuliers. Afin de définir la méthode de pré-sélection des sujets, nous avons cherché à déterminer le pourcentage de valeurs manquantes standard d’une étude de pupillométrie, en situation de dégustation, sans consigne particulière sur le clignement des yeux (pas d’obligation de ne pas cligner des yeux). Pour cela, des données collectées dans des conditions optimisées de luminosité ambiante et luminance d’écran (respectivement 100 lux et 30 cd/m² - cette optimisation de paramètres sera expliquée plus tard dans le paragraphe 1.3. Précautions à prendre) ont été analysées. Ces données avaient été collectées auprès de 25 participants, chacun réalisant 28 essais (mise en bouche de différentes solutions) en 3 séances, soit un total de 700 essais réalisés. Tout d’abord, le pourcentage de valeurs manquantes a été calculé pour chaque essai, le pourcentage moyen était de 5.90% (erreur standard : 0,50). Le pourcentage d’essais sous des seuils fixes successifs de valeurs manquantes de 0 à 100% a été ensuite observé (par le calcul étape par étape du pourcentage d’essais avec moins de 1%, 2%, 3%, jusqu’à 100% de valeurs manquantes) (Figure 20). Un point d’inflexion observé à 18 % semble mettre en évidence la limite entre les pourcentages de valeurs manquantes standards et les pourcentages de valeurs manquantes « anormaux », 91 % des essais avaient moins de 18% de valeurs manquantes. Sur la base de ces observations, nous avons choisi de fixer un **seuil de 18 % de valeurs manquantes** au-delà duquel la valeur peut être considérée comme « anormale ». Les expérimentateurs peuvent choisir d’utiliser le même seuil mais il est plutôt conseillé de le déterminer de la même manière dans leurs propres conditions expérimentales car le pourcentage de valeurs manquantes standard d’une étude de pupillométrie dépend beaucoup des conditions expérimentales.

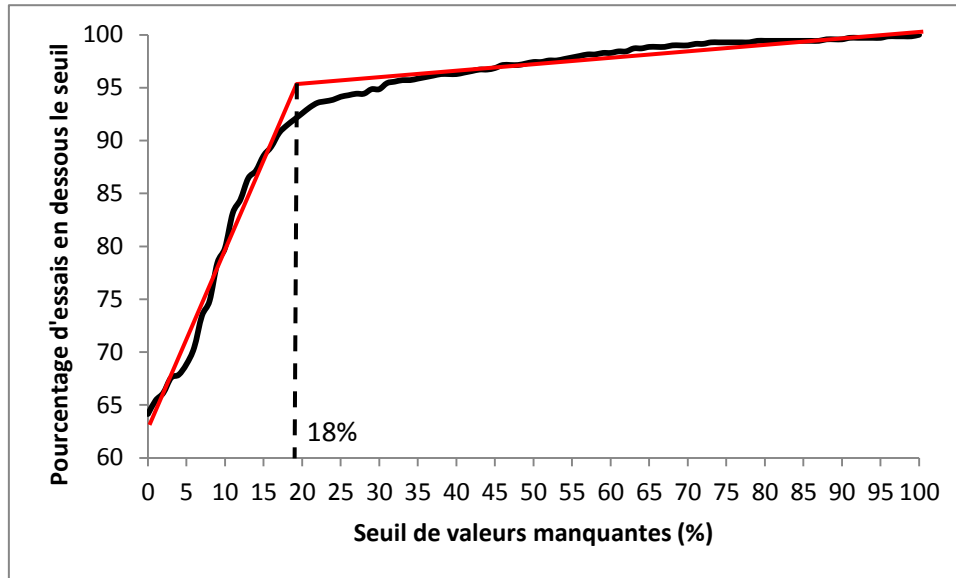


Figure 20. Pourcentage d’essais en dessous des seuils fixés successifs de valeurs manquantes allant de 0 à 100%

Ainsi, pour la pré-sélection, le diamètre de la pupille de chaque participant doit être mesuré pendant un court essai. Le pourcentage de valeurs manquantes est ensuite calculé. Nous recommandons de ne pas sélectionner les participants pour lesquels le pourcentage de valeurs manquantes dépasse le seuil fixé. Un algorithme MATLAB, annexé au présent document, permet le calcul de ce pourcentage et ainsi une prise de décision rapide quant à l’exclusion ou non d’un participant (DataPreselect.m). La pré-sélection peut être faite durant le recrutement ou lors de la première séance d’une étude.

Pour finir, il est intéressant de noter que **le port de lunettes n’est pas un motif d’exclusion**. En effet, durant l’ensemble de nos expérimentations, de nombreuses personnes portant des lunettes ont été sélectionnées sans que cela ne pose de problème particulier ; la qualité de leurs données était généralement suffisante pour permettre leur exploitation. Cette observation a été renforcée en testant l’effet port de lunettes sur la qualité des données de deux expérimentations différentes réalisées respectivement avec 46 et 44 sujets. L’effet du port des lunettes n’influe pas significativement la qualité des données [respectivement, $F(1,44) = 1,41$, $p = 0,242$] et $F(1, 42) = 0,69$, $p = 0,410$]. De la même manière, le port de lentilles de correction souples n’est pas un motif d’exclusion.

1.2. Procédure

1.2.1. La tâche

La tâche permettant la mesure de la réaction pupillaire en situation de dégustation peut être divisée en 3 périodes :

La période de repos. Durant cette période, on mesure le diamètre pupillaire en l’absence de stimulus. Cette mesure est utilisée pour le calcul de la ligne de base. La durée de cette période est fixée à 1s.

La période de mesure. Cette période consiste à mesurer la réponse pupillaire spécifique à un stimulus ou bien, lors d’une condition neutre (absence de stimulus), les variations naturelles de la pupille. La durée de cette période est fixée à 3s.

La période de rinçage. Pendant cette période, le sujet est invité à se rincer la bouche avec de l’eau et peut reposer ses yeux. La durée de cette période est fixée à 20-30s.

1.2.2. Le test

Pour l’acquisition des données, l’appareil utilisé étant un eye-tracker (oculomètre en français) de marque Tobii, le logiciel de contrôle expérimental Tobii Studio est utilisé. A chaque période est diffusé un écran sur l’eye-tracker Tobii. Pour les périodes de repos et mesure, les écrans doivent être neutres et identiques, nous recommandons l’utilisation d’un écran gris (ce choix sera expliqué dans le paragraphe 1.5. Précautions à prendre). Egalement, afin de permettre au sujet de fixer plus facilement l’écran, on centre une croix noire sur cet écran gris. La croix doit être fixe afin d’éviter l’influence des mouvements oculaires sur la mesure du diamètre pupillaire (Gagl , Hawelka & Hutzler, 2011). Enfin, l’écran pour la période de rinçage est libre puisqu’on ne s’intéresse pas à la mesure du diamètre pupillaire au cours de cette période. Cependant, afin d’éviter un trop brusque changement de luminosité, il est recommandé d’utiliser un écran de fond gris. On pourra alors indiquer au sujet qu’il peut détacher son regard, en remplaçant la croix par le mot « pause » par exemple.

1.2.3. Le déroulement du test

Chaque séance est individuelle. La procédure se déroule en quatre étapes :

1. Installation du sujet et explication de la séance.

L’installation du sujet sera détaillée dans le paragraphe 1.4 Appareil et installation. Il est recommandé d’expliciter oralement les consignes au sujet afin de minimiser la sollicitation des yeux et la réflexion. Ces consignes doivent être identiques pour tous les sujets.

2. **Calibration** de l’eye-tracker.

De la même manière la phase de calibration sera détaillée dans le paragraphe 1.4 Appareil et installation.

3. **Essais** à blanc.

La troisième étape consiste à effectuer plusieurs essais à blanc pour vérifier que le sujet a bien compris les instructions.

4. Mesures

Une fois le calibrage réalisé, et les instructions comprises par le sujet, le test peut démarrer.

1.3. Construction du test

Comme vu précédemment, le logiciel de contrôle expérimental Tobii Studio est utilisé. Ce logiciel permet de construire des scénarios qui vont pouvoir être diffusés aux sujets lors des séances. Les éléments du scénario seront des images, des fichiers textes, des vidéos, etc., selon ce que l’on souhaite

afficher à l’écran. Deux types de modalité d’affichage sont disponibles, temporisation ou passage manuel à l’élément suivant.

Selon la tâche proposée, notre scénario se compose d’un enchaînement de 2 écrans gris avec une croix noire centrale suivi d’un écran gris indiquant la pause. Les modalités d’affichage choisies sont :

- écran de repos : passage manuel au clic (le clic sera fait au moment de la stimulation ce qui permettra de capturer le temps initial)
- écran de mesure : temporisation (3s)
- écran de pause : passage manuel au clic.

Les écrans choisis sont intégrés en tant qu’images, cela permet de construire soi-même les écrans qui seront diffusés. Les fichiers images des écrans de mesure doivent porter un nom spécifique à la mesure effectuée (ex : pour les stimuli 1 et 2, les fichiers images ne porteront pas le même nom mais stimulus_1 et stimulus_2 par exemple). Les fichiers images des écrans de pause et de mesure ne doivent pas nécessairement porter un nom spécifique mais ne doivent pas porter le même nom que les fichiers des écrans de mesure pour éviter toute confusion. En effet, lorsque l’on nomme un élément cela n’est pas retranscrit dans le fichier des données. Le nom du stimulus dans les fichiers de données correspond au nom du fichier de l’élément et non pas au nom que l’on donne dans Tobii studio. Afin de pouvoir extraire les données après acquisition il est donc absolument indispensable de bien nommer chaque fichier avant de l’ajouter en tant qu’élément dans le scénario.

1.4. Appareil et installation

Pour l’ensemble de nos expérimentations l’appareil utilisé était un eye tracker de marque Tobii, le **Tobii T60** qui enregistre avec un taux d’échantillonnage de 60Hz (système écran, cf Figure 21). Cet appareil utilise la technique du reflet cornéen. Parmi les techniques d’enregistrements de la position du regard, c’est celle qui est sans doute la plus utilisée car elle permet notamment une bonne précision des mesures tout en laissant le participant libre de ses mouvements. Elle consiste à envoyer des faisceaux de lumière infrarouge émis par un ensemble de diodes (situées ici en dessous de l’écran) au



Figure 21. Eye-Tracker Tobii T60

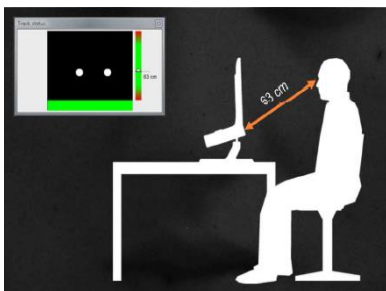


Figure 22. Placement du sujet pour une mesure pupillométrique optimale

centre de la pupille. Les reflets infrarouges renvoyés par la cornée de l’œil sont ensuite détectés et permettent, après calcul, de repérer le centre de la pupille et ainsi de connaître la position de fixation de l’œil sur une cible et également le diamètre pupillaire. Les données ont été à chaque fois collectées grâce au logiciel de contrôle expérimental Tobii Studio.

Afin d’obtenir des enregistrements de qualité optimale l’**installation du sujet** est importante. Il faut placer le sujet à bonne distance de l’écran et veiller à ce que l’appareil détecte bien ses yeux. Le sujet doit être placé à environ 60 cm de l’écran qui doit être incliné de manière à ce que les yeux du sujet se retrouvent au centre de l’écran (Figure 22). Pour vérifier le positionnement du sujet, on peut regarder l’indicateur mis en place par le logiciel Tobii

Studio (cf. miniature en haut à gauche de la Figure 22). Les yeux du sujet sont représentés par deux points blancs sur un écran noir. On peut ainsi vérifier qu’ils sont bien au centre de l’écran. De plus, une barre à droite de cet écran estime la distance à laquelle se trouve le sujet.

D’autre part, une **calibration de l’appareil** doit se faire pour chaque participant. Elle permet d’adapter les paramètres des algorithmes intégrés dans Tobii Studio permettant le calcul de la position de l’œil et l’estimation du diamètre pupillaire par rapport aux caractéristiques individuelles de chaque participant. Lors de cette calibration, le sujet doit suivre un point rouge à l’écran. De cette manière, l’appareil mesure le trajet des deux yeux sur 2, 5 ou 9 points de référence. Pour notre part, nous utilisons la calibration en 5 points (Figure 23).

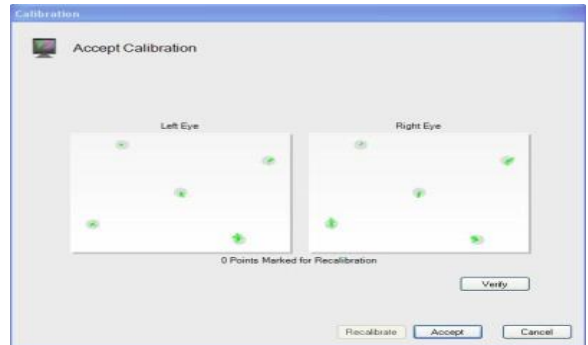
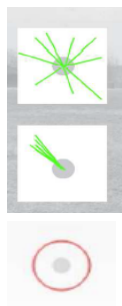


Figure 23. Résultat d'une calibration avec 5 points de référence (Tobii)

Plusieurs problèmes de calibration peuvent être rencontrés (Figure 24) :

- un problème de suivi de l’œil lié à des interférences causées par la lumière ambiante ou à la position du



Problème de suivi de l’œil

Problème d’erreur
systématique

Problème de détection

Figure 24. Problèmes pouvant être rencontrés lors de la calibration

sujet. Ce problème peut se résoudre en re-calibrant les points considérés.

- un problème d’erreurs systématiques causées par des déviations aux paramètres du modèle de Tobii. Ces déviations peuvent être liées à des lunettes ou à des lentilles de contact. Ce problème en revanche ne peut pas être résolu par une re-calibration.

- un problème de détection sur un point d’enregistrement. Dans ce cas il faut sélectionner le point en question (il est alors entouré d’un cercle rouge) et relancer.

1.5. Précautions à prendre

La réalisation d’un test de pupillométrie en situation de dégustation nécessite certaines précautions. Tout d’abord, il est absolument indispensable de **contrôler la luminosité ambiante et la luminance de l’écran**. En effet, la fonction principale de la pupille étant de réguler la quantité de lumière pénétrant dans l’œil, la mesure pupillométrique va être particulièrement sensible aux variations de lumières. De plus, la technologie utilisée se basant sur le reflet cornéen il faut également contrôler la lumière pour optimiser la mesure en termes de qualité. Pour les expérimentations il est donc conseillé de travailler dans une salle où l’environnement lumineux est optimisé et maîtrisé, c’est-à-dire bien orienté par rapport à l’appareil et au sujet (à optimiser au cas par cas selon la méthode décrite ci-après sachant qu’il est, de manière générale, déconseillé par Tobii d’utiliser des spots halogènes directement orientés vers les yeux du sujet ou vers les diodes infrarouges situées sous l’écran) et sans variations d’intensité incontrôlées au cours d’une même mesure. Pour cela, l’utilisation d’une lumière artificielle

aussi uniforme que possible dans la pièce et un écran identique durant toutes les mesures sont indispensables.

L’effet de ces paramètres de luminosité et luminance sur la qualité des données peut être testé en amont de l’expérimentation. Cela est d’ailleurs fortement conseillé afin d’éventuellement les optimiser. Pour cela il suffit de réaliser de courts essais dans les différentes conditions. De cette manière nous avons testé, lors d’une expérimentation menée avec 15 sujets, chacun de ces 2 facteurs avec 2 modalités (respectivement, lumière au plafond (100 lux), éclairage par spot (50 lux) et écran gris (30 cd / m²), écran noir (0,30 cd / m²)). La Figure 25 rapporte le pourcentage moyen de valeurs

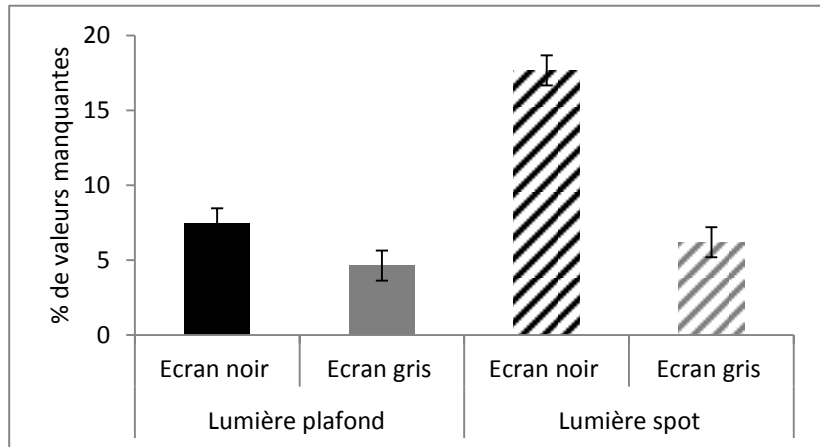


Figure 25. Pourcentages moyens de valeurs manquantes dans les différentes conditions d’éclairage et d’écran

(les barres d’erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

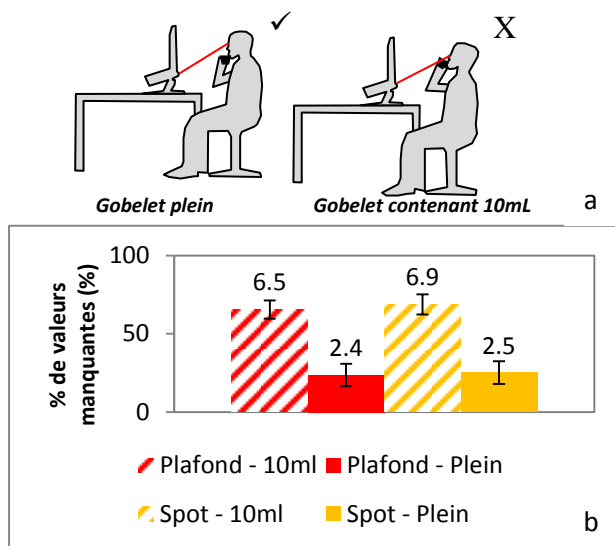


Figure 26. Pourcentage de valeurs manquantes dans les différentes conditions

(a) Illustration des conditions gobelet plein et gobelet contenant 10mL

(b) Pourcentage moyens de valeurs manquantes dans les différentes conditions

(les barres d’erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

La Figure 25 rapporte le pourcentage moyen de valeurs manquantes pour chaque condition. Les résultats ont montré un pourcentage de valeurs manquantes plus élevé pour l’écran noir ($M = 12.6$, $SE = 2.3$) que pour l’écran gris ($M = 4.6$, $SE = 1.0$) [$F(1,160) = 10.63$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.04$] et plus élevé pour l’éclairage spot ($M = 11.9$, $SE = 2.3$) que pour la lumière au plafond ($M = 6.1$, $SE = 1.1$) [$F(1,160) = 7.20$, $p = 0.008$, $\eta^2 = 0.03$]. Egalement, une interaction significative entre la lumière et l’écran [$F(1,160) = 3.89$, $p = 0.050$, $\eta^2 = 0.02$] a montré que l’effet éclairage dépendait de l’écran, à savoir le pourcentage de valeurs manquantes est plus faible pour la lumière au plafond uniquement avec l’écran noir ; avec l’écran gris, le pourcentage est équivalent pour les deux conditions d’éclairage. En conclusion, les meilleures conditions parmi celles testées sont lumière au plafond et écran gris. Cependant, bien qu’on puisse conseiller un écran gris pour l’écran de l’eye-tracker, pour l’éclairage, il est plutôt recommandé de tester avant toute expérimentation les différents éclairages possibles.

Il est également indispensable de **contrôler**

les mouvements du sujet (tête, bras). En effet, ces mouvements peuvent perturber le signal (perturbation des faisceaux Infra-Rouges émis par l’eye tracker et permettant les mesures – Figure 26 (a)) ou provoquer la dilatation ou la contraction de la pupille si la pièce n’est pas uniformément éclairée. Par conséquent, le sujet doit pouvoir consommer le produit sans aucun mouvement de tête, l’expérimentateur doit de ce fait, rendre la consommation du produit la plus facile possible. Par exemple, si le produit étudié est un produit liquide, il est recommandé de remplir le verre quasiment jusqu’en haut afin de permettre au sujet de prendre une gorgée sans avoir à lever la tête. Pour mettre en avant ces effets, une expérimentation a été menée sur 12 sujets. Deux facteurs ont été testés (lumière et remplissage du gobelet) chacun avec deux modalités (respectivement lumière au plafond/lumière spot (dirigée vers le plafond) et gobelet contenant une gorgée (10mL)/gobelet plein). La tâche consistait à mettre en bouche une gorgée d’eau (la totalité du gobelet lorsqu’il ne contenait que 10mL, l’équivalent pour le sujet d’une gorgée lorsque le gobelet était rempli). Chaque participant effectuait 3 répétitions par condition. Tout d’abord, cette expérimentation a permis de mettre en évidence une baisse de la qualité significative lorsque le gobelet ne contient qu’une gorgée [$F(1,261)=276.17$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.35$], la Figure 26 (b) rapporte les pourcentages moyens de valeurs manquantes dans les 4 conditions. La lumière n’a quant à elle pas d’effet sur la qualité des données [$F(1,261) = 0.85$, $p = 0.36$] ainsi que l’interaction entre les deux facteurs [$F(1,261) = 0.13$, $p = 0.72$]; l’effet du niveau de remplissage du gobelet ne dépend pas de la lumière. Ensuite, elle a également permis de souligner un artéfact dû à la lumière. En effet comme on l’expliquait plus haut, dans le cas d’un éclairage non uniforme, les mouvements de tête peuvent provoquer une dilatation ou contraction de la pupille. Ici, nous avons observé une contraction significative dans la condition lumière au plafond-gobelet de 10mL (Figure 27) et un « retardement » de la dilatation dans la condition spot-gobelet de 10mL. En effet le sujet en levant la tête, oriente ses yeux vers une source de lumière ce qui entraîne une contraction de ses pupilles. Dans le cas de la lumière au plafond, la luminosité augmente au point de non seulement gommer la dilatation mais aussi d’entraîner une contraction. On verra dans le chapitre suivant, rapportant les résultats du screening des effets des différents stimuli chimiosensoriels, que l’observation d’une dilatation consécutivement à la mise en bouche d’eau de l’ordre de grandeur observée ici est une observation normale.

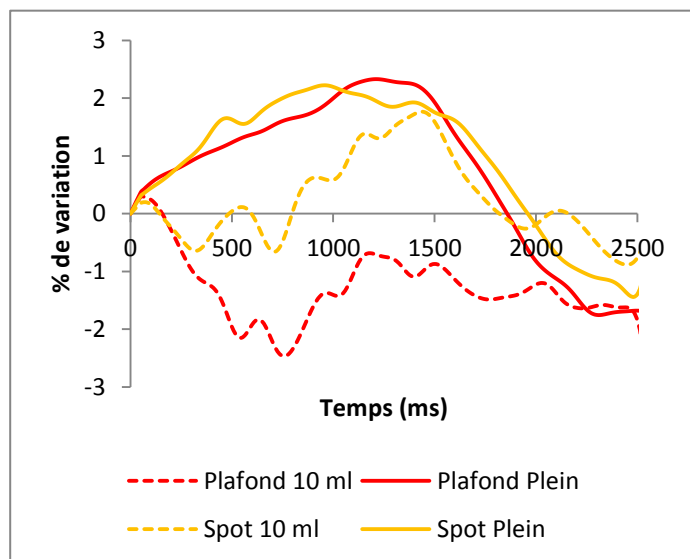


Figure 27. Evolution du diamètre dans les 4 conditions (combinaisons éclairage et remplissage du gobelet)

2. Pré-traitements des données

2.1. Extraction des données

A partir des données brutes, on extrait les réponses pupillaires spécifiques pour chaque stimulus. Les variables d'intérêt sont le temps, le diamètre des pupilles droite et gauche, et l'événement. Selon le logiciel d'acquisition utilisé, un indice de qualité/validité pour chaque mesure peut aussi être extrait ; c'est le cas pour Tobii Studio (cf Tableau 26). Cet indice va permettre de calculer le pourcentage de valeurs manquantes de chaque enregistrement. Sachant que le temps de latence de la réaction pupillaire est de 200-250 millisecondes (Rougier & Riss, 2000), et que d'après nos observations, le pic de dilatation est atteint au bout d'1 à 2s, les résultats sont observés sur une période de 2,5s après la stimulation. Egalement, les données 1s avant le stimulus sont extraites afin de permettre le calcul de la ligne de base.

Tableau 26. Indice de qualité avec Tobii Studio

Code validité		Yeux/Œil trouvé(s)	Signification
Œil gauche	Œil droit		
0	0	Les deux	Correctement identifié
4	0	Droit	Correctement identifié
0	4	Gauche	Correctement identifié
3	1	Droit	Probable
1	3	Gauche	Probable
2	2	Un œil	Incertain
4	4	Aucun	Incertain

2.2. Nettoyage des données

Quel que soit l'appareil utilisé, il y aura toujours des pertes de données se traduisant par des valeurs manquantes qui seront principalement dûes aux clignements des yeux. Ces valeurs manquantes sont soit arbitrairement enregistrées comme une valeur par défaut ou bien supprimées par le logiciel de contrôle expérimental ; le logiciel Tobii Studio attribue la valeur '-1' aux données manquantes. Elles peuvent être estimées par régression ou interpolation. Cependant, trop de valeurs manquantes peuvent affecter la qualité du signal. Les enregistrements avec un pourcentage de valeurs manquantes supérieur au seuil fixé pour la pré-sélection des sujets doivent être exclus.

Selon Jackson & Sirois (2009), si une valeur est manquante sur un seul œil, elle peut être estimée par la valeur de l'autre œil car il existe une bonne corrélation entre les diamètres des pupilles gauche et droite (>0.9). Dans le cas contraire, une interpolation linéaire peut être réalisée à partir de la moyenne des trois dernières valeurs avant et les trois valeurs après la « pause ». Pour réaliser ces estimations, Jackson & Sirois (2009) ont créé une fonction MATLAB que nous avons réutilisée (DataCleanLR.m). Cette fonction commence par filtrer les données, plus explicitement, les données sont lissées en utilisant des moyennes mobiles. Nous avons adapté la fonction afin que le filtrage appliqué puisse être précisé

lors de l’appel de la fonction. Aussi, nous avons choisi de travailler avec des moyennes mobiles de 10 points (166.67ms à 60Hz), moyenne de nos observations dans la littérature (Chapitre 2 - Tableau 23). Ensuite les valeurs manquantes sont estimées soit par régression (valeur manquante sur un seul œil) ou interpolation linéaire (valeurs manquantes sur les deux yeux) avant que les diamètres pupillaires soient moyennés sur les deux yeux. La méthode de régression se déroule en 3 étapes :

- Pour les mesures où le diamètre pupillaire a pu être **mesuré sur les deux yeux**, calcul de 5 paramètres :

$$s = \sum \text{diamètres pupillaires gauches}$$

$$ss = \sum \text{diamètres pupillaires gauches}^2$$

$$z = \sum \text{diamètres pupillaires droits}$$

$$zz = \sum \text{diamètres pupillaires droits}^2$$

$$sz = \sum \text{diamètres pupillaires droits} \times \text{diamètres pupillaires gauches}$$

$$k = \text{nombre de mesures où le diamètre pupillaire a été mesuré sur les deux yeux}$$

- A partir de ces paramètres, calcul de nouveaux paramètres:

$$r1 = ss - s \times \frac{s}{k} \quad B_RL = \frac{r3}{r1}$$

$$r2 = zz - z \times \frac{z}{k} \quad B_LR = \frac{r3}{r2}$$

$$r3 = sz - s \times \frac{z}{k} \quad K_RL = \frac{z}{k} - B_RL * \frac{s}{k}$$

$$r = \frac{r3}{\sqrt{r1 \times r2}} \quad K_LR = \frac{z}{k} - B_LR * \frac{z}{k}$$

- Pour finir, la valeur manquante sur l’œil considéré est remplacée : $xl = B_{LR} \times xr + K_{LR}$ si la valeur est manquante sur l’œil gauche, $xr = B_{RL} * xl + K_{RL}$ si la valeur est manquante sur l’œil droit).

On prend ainsi en considération que les diamètres pupillaires gauche et droit sont corrélés (>0,9) mais différents.

2.3. Correction de la ligne de base

Comme nous l’avons rapporté dans le chapitre 2, chaque sujet a une taille de pupille différente. Une expérimentation a été mise en place afin d’observer cette variabilité interindividuelle et l’impact que celle-ci pouvait avoir sur le réflexe photomoteur (amplitude de réaction et temps de latence). Cette expérimentation menée avec 24 participants consistait à présenter au participant, soit un écran gris (30 cd/m²) suivi d’un écran blanc (130cd/m²) pour étudier la contraction du réflexe photomoteur, soit un écran gris (30 cd/m²) suivi d’un écran noir (0.30cd/m²) pour étudier la dilatation du réflexe photomoteur. Chaque participant effectuait 3 répétitions de chaque mesure. Cette expérimentation a permis de **confirmer l’existence d’une variabilité inter-sujets** en termes de **taille de pupille**. Une analyse de la variance à 3 facteurs (sujet, écran et répétition) a en effet mis en évidence un fort effet sujet

[$F(23,187)=23,55$, $p<0.001$, $\eta^2 = 0.009$]. Pour les trois écrans, noir, gris et blanc, les moyennes étaient respectivement de $M = 3.32\text{mm}$ ($SE = 0.05$), $M = 2,98\text{mm}$ ($SE = 0.05$) et $M = 2.45\text{mm}$ ($SE = 0.03$). L’écart entre le plus petit diamètre et le plus grand diamètre était respectivement, de 1.8mm pour l’écran noir, 1.6mm pour l’écran gris et 1.3mm pour l’écran blanc. Cette expérimentation a également permis de mettre en évidence une variabilité inter-sujet en termes d’**amplitude de réaction** et de **temps de latence**. En effet, l’étude du réflexe de contraction a montré un effet sujet sur l’amplitude de réaction [$M = 0.74$, $SE = 0.03$; $F(23, 46) = 6.86$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.07$] et sur le temps de latence [$M = 252.39$, $SE = 3.76$; $F(23, 43) = 2.12$, $p = 0.017$, $\eta^2 = 0.008$]. Egalement, l’étude du réflexe de dilatation a montré un effet sujet sur l’amplitude de réaction [$M = 0.45$, $SE = 0.02$; $F(20, 36) = 5.04$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.10$] mais pas sur le temps de latence [$M = 345.25$, $SE = 18.14$; $F(19, 33) = 1.52$, $p = 0.142$, $\eta^2 = 0.059$]. Enfin, on note que de diamètres moyens variables entre sujets peuvent résulter des amplitudes de réaction variables entre sujets. **Plus le diamètre initial est grand plus l’amplitude de contraction sera grande** ($R = 0.79$, $p < 0.001$). Ceci ne s’observe pas pour le réflexe de dilatation ($R=0.18$, $p=0.18$) ce qui peut s’expliquer par le contraste de luminance moins important entre les écrans gris et noir (29.7cd/m^2) qu’entre les écrans gris et blanc (100cd/m^2), l’amplitude de réaction était d’ailleurs plus importante pour le réflexe de contraction que pour le réflexe de dilatation. En revanche, **le temps de latence n’est pas corrélé au diamètre moyen** ($R = 0.20$, $p = 0.10$). Ces observations montrent l’importance de corriger les données afin de supprimer au maximum les variabilités interindividuelles notamment en termes de taille de pupille, effet le plus marqué. Cette correction se fait par le retrait de la ligne de base. Egalement, on le verra plus tard dans le descriptif de la méthode de comparaison temps par temps (3.3. Comparaison temps par temps, p 107) des moyennes mobiles seront calculées pour gommer les variations en termes de temps de latence.

Aussi, la dernière étape dans le pré-traitement des données consiste à réaliser la correction de la ligne de base. Pour cela, le diamètre pupillaire moyen de -200ms à 0s par rapport au stimulus est calculé et utilisé comme référence comme on le retrouve souvent dans la littérature (Kuchinke et al., 2007 ; Vö et al., 2008 ; Borneman et al., 2010 ; Raisig et al., 2010 ; Kuchinke et al., 2011 ; Prehn et al., 2011 ; Wierda et al., 2012). Les données sont corrigées en retirant cette valeur de référence. Cette valeur de référence représente le diamètre pupillaire juste avant la stimulation. Cette correction permet ainsi de retirer la variabilité interindividuelle en termes de taille de pupille, mais également un éventuel résidu d’une précédente réaction pupillaire. Le résultat peut être exprimé de deux manières, diamètre pupillaire corrigé en mm ou pourcentage de variation tel que $\%_{\text{variation}} = \frac{X_{\text{data}} - \text{ref}}{\text{ref}}$. Il peut être intéressant d’utiliser les deux modes d’expression afin d’avoir au moins un élément comparable avec les résultats retrouvés dans la littérature. Cependant, pour les tests statistiques, nous utilisons le pourcentage de variation qui permet le retrait de plus de variabilité interindividuelle puisqu’il est relatif à la taille de pupille du sujet.

Un algorithme MATLAB a été créé afin de permettre la réalisation de ces étapes de pré-traitements (PupilloDataPreprocess.m).

3. Traitement des données

L’ensemble des méthodes de traitement des données présentées ci-dessous ont au moins un de ces deux objectifs: (i) la comparaison d'un produit à une situation de contrôle, afin de savoir s'il y a une dilatation pupillaire significative, (ii) la comparaison de deux ou plus stimuli afin de savoir s’il existe une différence entre eux en termes de dilatation de la pupille.

3.1. Courbes

Cette méthode permet une première interprétation visuelle des résultats. Elle peut répondre aux deux objectifs précédemment cités. Elle consiste à tracer l’évolution du diamètre pupillaire dans le temps, consécutif à chaque stimulus à comparer. Afin de rendre les courbes plus informatives, un intervalle de confiance (IC) peut-être ajouté, permettant de mettre en évidence les périodes pour lesquelles les diamètres pupillaires observés sont significativement différents entre les stimuli comparés. Comme il ne s’agit que d’une première interprétation visuelle, nous avons choisi d’utiliser un IC à 90% afin d’observer même les tendances. Deux réponses sont considérées comme équivalentes lorsque les courbes, intervalles de confiance compris se chevauchent. Inversement, lorsque les deux courbes, intervalles de confiance compris ne se chevauchent pas, les deux réponses sont interprétées comme significativement différentes (Figure 28).

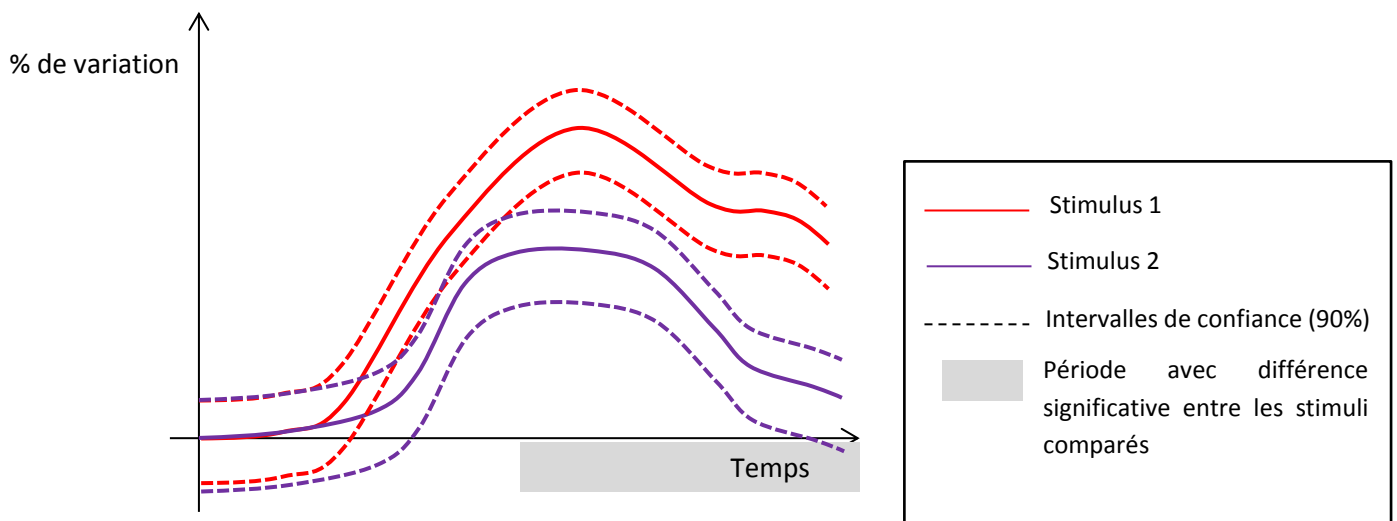


Figure 28. Illustration de la méthode « courbes »

3.2. Pic de dilatation

Cette deuxième méthode consiste à comparer l’amplitude de dilatation pupillaire entraînée par les stimuli étudiés. Elle permet de répondre au second objectif et éventuellement également au premier objectif si la situation contrôle choisie entraîne une dilatation pupillaire. Le pic de dilatation est défini

comme le pourcentage de variation maximum observé dans les 2.5s consécutives au stimulus. Ce paramètre est soumis à une ANOVA à deux facteurs, stimuli et sujets.

3.3. Comparaison temps par temps

La comparaison temps par temps a pour objectif d’identifier les périodes où des différences sont observables entre les stimuli comparés. Pour cela, les moyennes mobiles des pourcentages de variation sur 200ms sont calculées ce qui permet de gommer les variabilités inter-sujet en termes de temps de latence. Ces moyennes sont ensuite comparées entre les stimuli par la réalisation d’une ANOVA à deux facteurs, stimuli et sujets, temps par temps. Afin de visualiser les différences, la statistique F du facteur stimuli est tracée au fil du temps. Un seuil de significativité est ajouté à la courbe correspondant à un niveau de significativité de $\alpha = 0.05$. Lorsque la courbe F est au-dessus du seuil de significativité alors on conclut qu’il y a une différence entre les stimuli comparés (Figure 29).

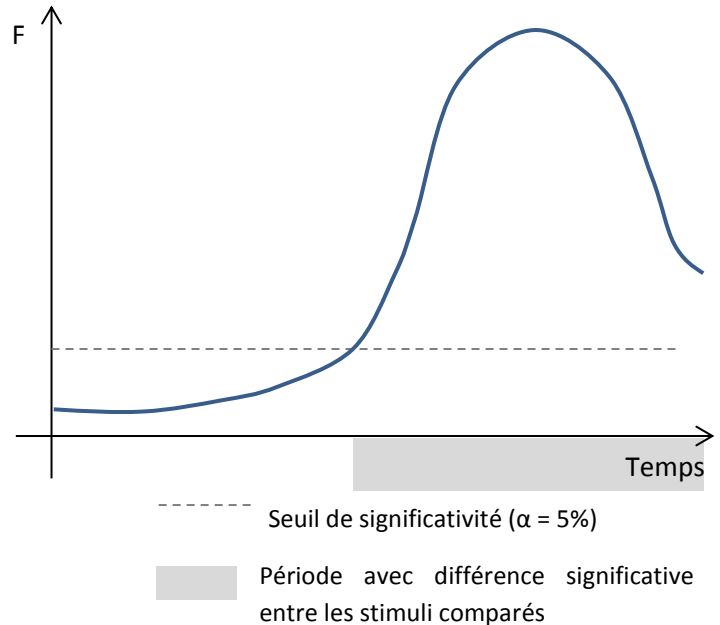


Figure 29. Illustration de la comparaison temps par temps

3.4. ACP

Enfin, la dernière méthode proposée est l’Analyse en Composantes Principales (ACP). Elle n’est réalisée que si une différence est observable lors de la comparaison temps par temps. Aussi, pour l’analyse, seule la/les période(s) où les stimuli sont différents est/sont utilisée(s). Dans cette analyse, un sujet exposé à un stimulus est une observation et les pourcentages de variations aux différents temps sont les variables. Afin de déterminer le nombre de composantes à retenir pour un résumé suffisamment précis de l’information contenue dans les données initiales, le critère du coude est utilisé. Cela consiste à analyser graphiquement les contributions des axes dans cette ACP, et de s’arrêter quand l’inertie d’un axe devient faible et que l’inertie de l’axe suivant est clairement inférieure à celle-ci. En pratique, on trace le graphique des valeurs propres et on observe quand un décrochement (coude) suivi d’une décroissance régulière apparaît. Les axes avant le décrochement sont sélectionnés. Ensuite, les poids factoriels (ou factor loadings = corrélations/racine (valeur propre), traduisent la corrélation entre les variables et les facteurs) de ces composantes sont tracés. Comme suggéré par Kuchinke et al. (2007), seuls les factor loadings avec une valeur absolue supérieure à 0.4 seront pris en considération pour l’interprétation. L’interprétation consiste, à partir de l’observation parallèle des factor loadings et des courbes d’évolution du diamètre pupillaire, d’identifier des paramètres qui retranscrivent les

composantes. Ces paramètres sont ensuite calculés et, afin de valider l’interprétation des composantes, la corrélation entre chaque composante et le paramètre associé est calculée. La Figure 30 rapporte les résultats d’une comparaison d’un stimulus au contrôle (silence). La Figure 30(a) montre l’évolution du pourcentage de variation pour les deux conditions comparées ; les signaux étaient différents de 600ms à la fin. La Figure 30(b) rapporte les factor loadings de la première et seule composante retenue lors de l’ACP sur la période précédemment citée (93,47% de la variance). L’observation en parallèle de ces deux graphiques permet de voir que la composante retenue retranscrit le signal moyen. En effet, la corrélation entre les coordonnées sur cette composante et les moyennes pour chaque observation est significative ($R=0.999$, $p=1.35E-92$). Enfin, une analyse de la variance à deux facteurs, stimuli et sujets, est réalisée sur chaque composante afin de déterminer son pouvoir discriminatif. Ici, un effet significatif signifierait que les stimuli comparés entraînent chacun une réponse pupillaire moyenne différente.

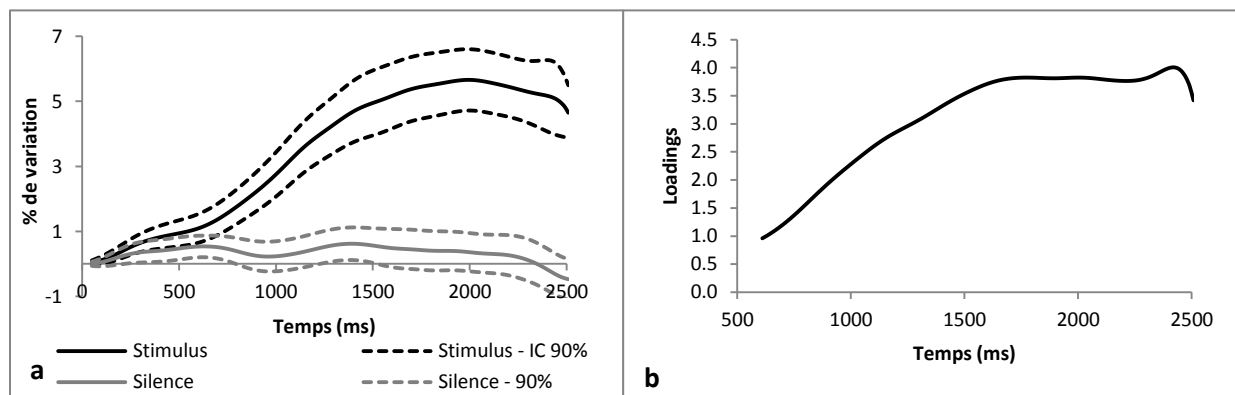


Figure 30. Illustration de l'interprétation de résultats d'ACP

(a) Evolution du pourcentage de variation des stimuli comparés avec intervalles de confiance à 90%

(b) Factor loadings de la première et seule composante retenue lors de l'ACP sur la période significative (93,47% de la variance)

L'ensemble de ces méthodes peut être appliqué en utilisant notre algorithme MATLAB prévu à cet effet (DataProcess.m).

4. Description des algorithmes Matlab mis à disposition

Différents algorithmes Matlab (certains sont des adaptations d'algorithmes écrits et/ou utilisant une fonction écrite par Jackson & Sirois (2009)) ont été développés et sont disponibles à l'adresse suivante : <http://tqmp.org/Content/vol10-2/p179/p179.zip>.

NB :

1. Ces programmes sont écrits pour les fichiers de données extraits de Tobii Studio. Pour les autres types de fichiers, une adaptation est nécessaire.

2. Ils sont écrits dans le but de comparer un produit et une situation de contrôle ou des produits entre eux. L'ajout d'autres facteurs que sujets et stimuli nécessitera une adaptation des programmes.

Note aux programmeurs : Ces programmes peuvent être améliorés, adaptés et/ou modifiés ; n'hésitez pas à les réécrire.

Prérequis : Comme nous précisons plus haut, afin d’être en mesure de récupérer les données de réponse pupillaire spécifique à chaque stimulus, un fichier avec un nom spécifique doit être ajouté pour chaque élément de mesure du scénario. Nous recommandons de le nommer « StimulationX » pour chaque stimulus et de l’ajouter comme image au format jpg. En effet, le nom par défaut des stimuli dans nos algorithmes Matlab est « StimulationX.jpg ».

4.1. Pré-sélection des sujets

L’algorithme « DataPreselect.m » a été écrit afin de répondre à la problématique de pré-sélection des sujets. Il permet le calcul du pourcentage de valeurs manquantes pour un stimulus choisi afin d’aider la prise de décision quant à la sélection ou non d’un sujet. Cet algorithme fait appel à la fonction « Data_export_quality.m ». Il doit être utilisé pour un participant à la fois. Certaines informations doivent être spécifiées au lancement de cet algorithme :

- Nombre de lignes à supprimer

Ce nombre correspond au nombre de lignes présentes en en-tête du fichier de données. Ce nombre est de 25 au minimum lorsqu’aucune variable n’est ajoutée au scénario mais peut être plus important. Pour le connaître, il suffit d’ouvrir un fichier de données et de regarder le nombre de lignes avant la première ligne de données

- Nombre de valeurs à extraire après stimulation

Ce nombre correspond au nombre de valeurs pour lesquelles l’indice de qualité sera récupéré. Il dépend de la durée du stimulus testé pour la pré-sélection. Nous recommandons de fixer la durée du stimulus à 2s et de récupérer les données sur 1.5s, soit 90 valeurs si la fréquence d’échantillonnage est de 60Hz.

- Seuil de valeurs manquantes

Il s’agit du seuil que vous avez choisi de fixer pour décider si oui ou non un enregistrement est correct ou pas (cf 1.1. Participants).

- Nom du stimulus

Il s’agit du nom qui dans le fichier de données correspond au stimulus testé

Le programme donne alors le pourcentage de valeurs manquantes observées et la décision :

« Ce participant peut participer » ou « Ce participant doit être exclu »

Une synthèse des différentes étapes est représentée sur la Figure 31.

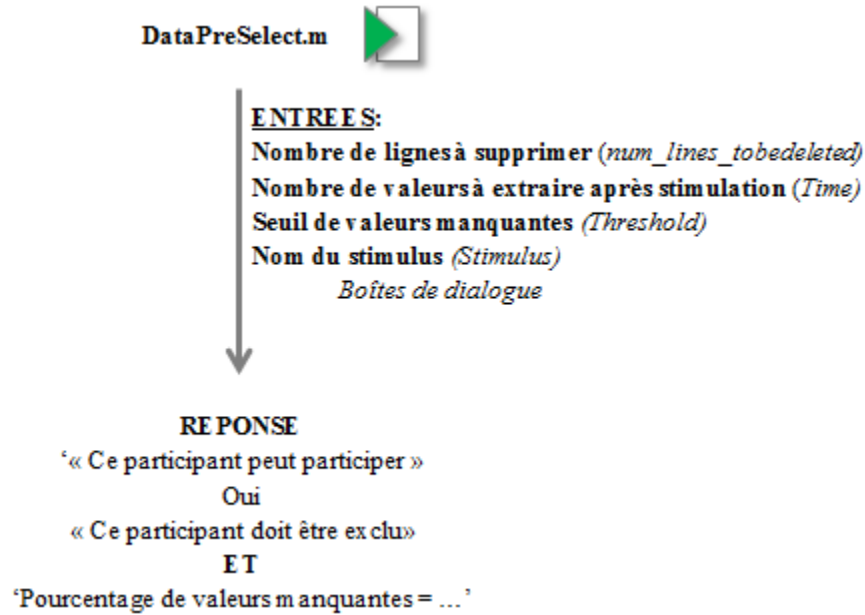


Figure 31. Etapes de l'algorithme "DataPreselect.m"

4.2. Pré-traitements des données

L'algorithme « DataPreprocess.m » permet la réalisation des trois étapes de pré-traitement, à savoir, l'extraction et le nettoyage des données et la correction de la ligne de base. Il fait appel aux fonctions « Data_export_data » et « DataCleanLR » pour le nettoyage. Toute utilisation de cette dernière fonction doit reconnaître et citer la source (Jackson & Sirois, 2009).

Dans l'ordre chronologique, ce programme:

- Extrait les données 1s avant et 2.5s après chaque stimulus (respectivement 60 et 150 valeurs avec une fréquence d'échantillonnage de 60 Hertz, une adaptation est nécessaire si la fréquence d'échantillonnage est différente).
- Nettoie les données
- Corrige les données

Une nouvelle fois, afin d'exécuter cet algorithme, certaines informations doivent être spécifiées :

- Nombre de stimulations

Ce nombre correspond au nombre de stimulations pour lesquelles la réponse pupillaire doit être prise en compte, répétitions comprises (par exemple, si dans une même séance, trois produits sont testés et répétés chacun 2 fois, on comptera 6 stimulations bien qu'il n'y ait que 3 stimuli différents).

- Noms des stimulations

Ces noms sont ceux présents dans le fichier de données et correspondants à chaque stimulation. Par défaut, les noms sont, comme nous l'avons précédemment précisé, « StimulationX.jpg » dans l'algorithme. Attention: si un stimulus est répété, toutes les répétitions de ce stimulus doivent être regroupées (ou le programme modifié).

- Nombre de lignes à supprimer

Comme pour « DataPreselect.m », ce nombre correspond au nombre de lignes présentes en tête du fichier de données. Ce nombre est de 25 au minimum lorsqu’aucune variable n’est ajoutée au scénario mais peut-être plus important. Pour le connaître, il suffit d’ouvrir un fichier de données et de regarder le nombre de lignes avant la première ligne de données.

Enfin, il est également nécessaire de préciser (1) si les données de mauvaise qualité doivent être supprimées et si oui, préciser le seuil de valeurs manquantes choisi et (2) s’il y a des répétitions et si oui, combien de stimuli différents sont testés, quels sont les noms à donner à ces stimuli et combien de fois ils sont répétés.

Une synthèse des différentes étapes est représentée sur la Figure 32.

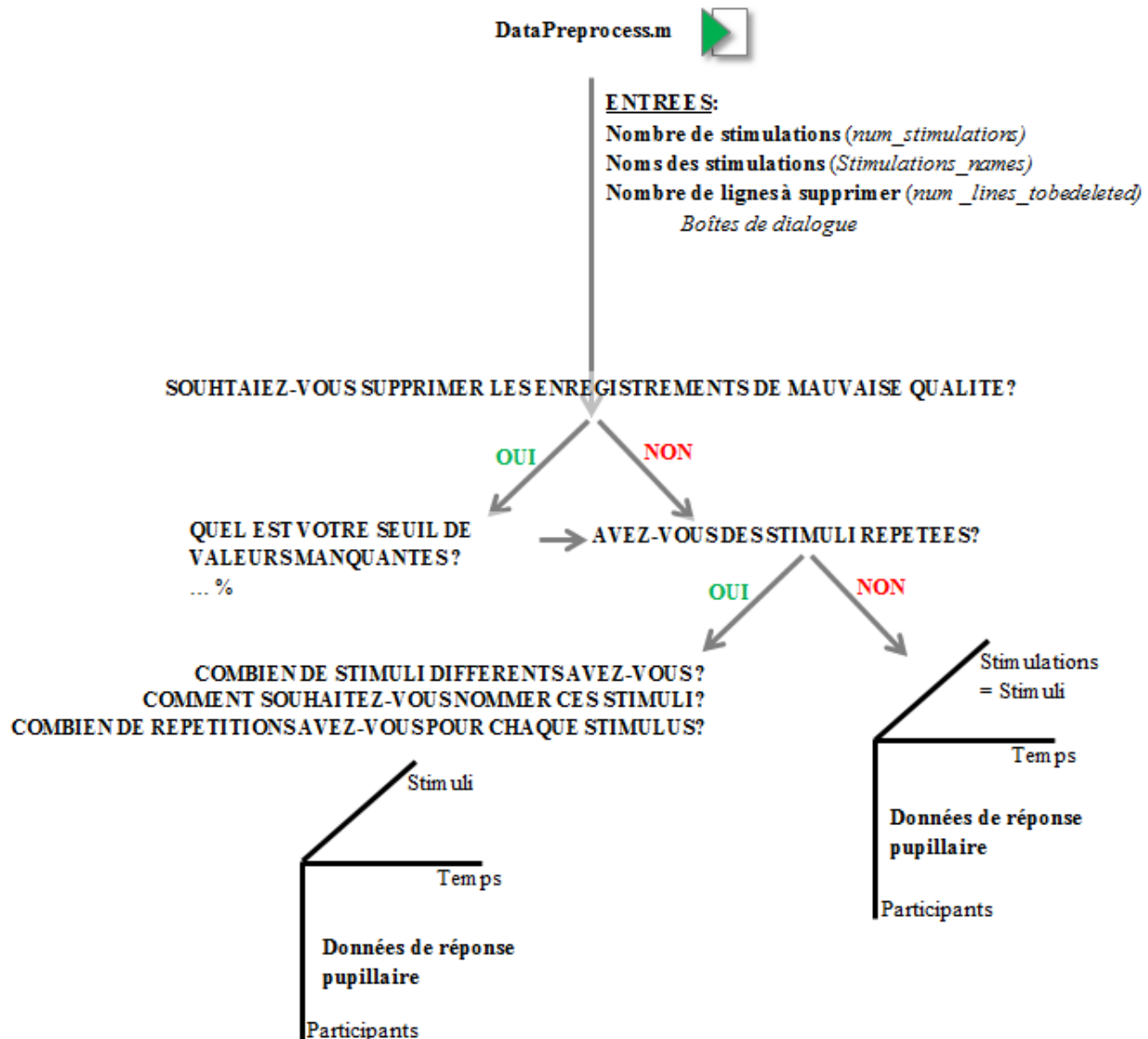


Figure 32. Etapes de l'agorithme "DataPreprocess.m"

4.3. Traitements des données

L’algorithme « DataProcess.m » permet le traitement des données pupillaires selon les quatre méthodes citées plus haut :

- Courbes
- Pic de dilatation
- Comparaison temps par temps
- ACP

Pour cela, l’algorithme « DataPreprocess.m » doit bien sûr avoir été lancé avant ; certaines sorties de cet algorithme sont nécessaires, à savoir les données nettoyées (en mm et %). Egalement, le nombre et le rang des stimuli (dans les matrices de sorties de « DataPreprocess.m ») à comparer doivent être spécifiés ainsi qu’éventuellement la statistique F seuil du facteur stimulus (uniquement si le nombre de stimuli est supérieur à 11 et/ou le nombre de degré de liberté de l’erreur est supérieur à 41 ; si ce n’est pas le cas, l’algorithme le récupère tout seul). Egalement, il est nécessaire de préciser si la comparaison se fait entre des stimuli « réels », c’est-à-dire entre des stimuli entraînant une dilatation pupillaire. Cette information permet de savoir si des pics de dilatation doivent être calculés et comparés. Ensuite, les résultats des ANOVA de la comparaison temps par temps s’affichent afin que l’expérimentateur puisse voir s’il y a une/des période(s) où il existe des différences et si c’est le cas pour spécifier les plages de temps pour l’ACP (en autant de fois qu’il y a de périodes). Enfin, si une ACP est réalisée, le graphique des valeurs propres s’affiche pour que l’expérimentateur puisse indiquer le nombre de composante(s) à retenir (selon le critère du coude).

Les différentes étapes sont rappelées dans la Figure 33.

NB : Cet algorithme utilise la table de Fisher afin de récupérer le F seuil nécessaire pour le graphique de la comparaison temps par temps. Cette matrice doit être ajoutée dans le « Current Folder ».

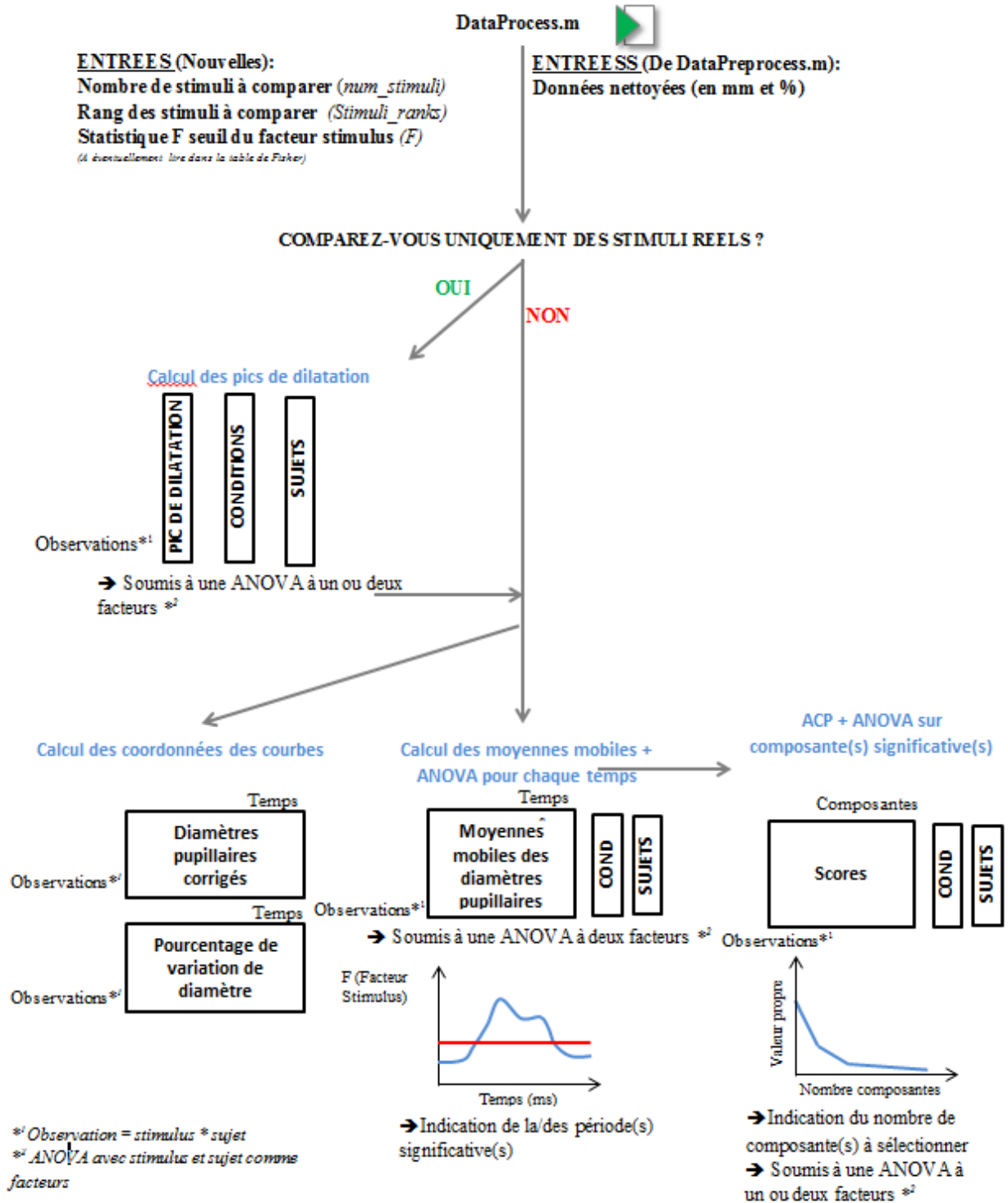


Figure 33. Etapes de l'algorithme "DataProcess.m"

4.4. Observation des résultats

L’algorithme précédant n’affiche pas les résultats. Pour ce faire, les programmes suivants doivent être utilisés: Results_Curves / Results_PeakDilation / Results_TimesComparison / Results_PCA.

4.4.1. Courbes

L’algorithme Results_Curves permet de tracer les courbes d’évolution du diamètre pupillaire. Pour cela, il est nécessaire de répondre à quatre questions:

«Voulez-vous tracer le pourcentage de variation du diamètre pupillaire en fonction du temps? (OUI ou NON)

«Voulez-vous ajouter des intervalles de confiance? » (OUI ou NON)

«Voulez-vous tracer l’évolution du diamètre pupillaire corrigé en fonction du temps ? » (OUI ou NON)

«Voulez-vous ajouter des intervalles de confiance? » (OUI ou NON)

4.4.2. Pics de dilatation

L’algorithme Results_PeakDilation indique s’il y a une différence significative en termes d’amplitude de dilatation entre les stimuli comparés et affiche la table des résultats de l’ANOVA.

4.4.3. Comparaison temps par temps

L’algorithme Results_TimesComparison indique s’il y a des périodes où des différences sont observables entre les stimuli comparés. Il permet également de tracer la p-value et/ou la statistique F de l’effet stimulus en fonction du temps. Pour ce faire, il est nécessaire de répondre aux deux questions suivantes :

«Voulez-vous tracer la p-value de l’effet stimulus en fonction du temps? » (OUI ou NON)

«Voulez-vous tracer la statistique F de l’effet stimulus en fonction du temps? » (OUI ou NON)

4.4.4. ACP

Enfin, l’algorithme Results_PCA indique s’il y a une/des composante(s) qui discrimine(nt) les stimuli et trace les factor loadings pour permettre l’interprétation.

5. Discussion et conclusion

Le guide méthodologique présenté ici a été développé afin d’accompagner toute personne intéressée pour tester la pupillométrie en situation de dégustation en lui fournissant un outil complet. Nous présentons une méthode qui va de l’acquisition au traitement de données. Cette méthode n’est pas l’unique méthode envisageable et peut bien sûr être améliorée ou adaptée.

Les tests de pupillométrie en situation de dégustation permettent de mesurer la réaction pupillaire consécutive à la dégustation d’un produit mais avec certaines **limites**. Tout d’abord, les **conditions de dégustation ne sont pas naturelles**. La dégustation se fait dans une salle de test, le sujet doit se concentrer sur un écran pendant que ses mouvements sont limités et tout cela, avec un expérimentateur à côté de lui. Pour rendre les conditions un peu plus naturelles, l’utilisation de lunettes d’eye-tracking plutôt que l’écran pourrait être envisagée. Le sujet serait alors plus libre de ses mouvements même s’il n’était toujours pas dans des conditions naturelles. Cependant, ceci nécessiterait de prendre en compte les variations de lumière à partir d’un luxmètre pour retirer les variations dues à ce facteur (réflexe photomoteur) (Watson & Yellott, 2012). Une autre limite est l’**absence de qualification des éventuelles émotions mesurées**. Pour qualifier ces émotions, il est nécessaire d’ajouter un questionnaire dans lequel le sujet évaluerait des items d’émotions. Un questionnaire existant pourrait être utilisé, mais attention, celui-ci se devrait d’être court car il serait répété de nombreuses fois pendant le test et à de courts intervalles de temps. Ainsi, la seule chose dont nous sommes vraiment sûrs au travers de la dilatation de la pupille c’est l’« éveil » (« arousal »). Aussi, pour avoir des résultats plus fiables, le **couplage avec d’autres mesures physiologiques** pourrait être intéressant (par exemple, la réponse électrodermale ou la fréquence cardiaque). Egalement, pour limiter les mouvements, l’expérimentateur pourrait envisager l’**utilisation d’une mentonnière ou d’une paille**. Cependant, la mentonnière et la paille ne sont pas adaptées à la dégustation de tout produit alimentaire (ex : les produits liquides pour la mentonnière, produit alimentaire solide, whisky pour la paille). L’objectif de la méthode est de pouvoir s’adapter à tous les produits alimentaires, les solutions spécifiques ne peuvent pas être proposées, mais l’expérimentateur sera libre d’adapter la procédure à son / ses produits pour rendre sa consommation facile sans mouvement de la tête.

Notons également que les **algorithmes MATLAB** pourraient être améliorés, à travers le **développement d’une interface** par exemple. Cependant, cela nécessite beaucoup de temps et surtout peut ne pas être stable d’une version de logiciel à une autre, d’un système d’exploitation à un autre.

Enfin, pour aller plus loin, d’autres **analyses multidimensionnelles** pourraient être envisagées telles que l’Analyse en Composante Indépendante (ACI) comme suggérée par Jainta & Baccino (2010) ou l’analyse discriminante, plus précisément la PLS-DA (Partial Least Squares – Discriminant Analysis) (Barker & Rayens, 2003).

Pour conclure, en proposant cette méthode, nous offrons la possibilité à tout expérimentateur de réaliser rapidement un test de pupillométrie en situation de dégustation mais avec certaines limites. Parmi ces limites, l’absence de qualification des émotions, ce qui nécessite un couplage avec un questionnaire qualitatif, le manque de naturel dans la situation de dégustation et enfin la difficulté de contrôler toutes les autres sources de variations du diamètre de la pupille (stress, fatigue, etc.).

Ce chapitre a fait l’objet d’une publication (cf annexe n°6 ou <http://tqmp.org/Content/vol10-2/p179/p179.pdf>).

CHAPITRE 4 : IMPACT DES STIMULI CHIMIOSENSORIELS SUR LE DIAMÈTRE PUPILLAIRE

1. Objectif

Avant d'évaluer le potentiel de la pupillométrie pour discriminer des produits en termes de préférences et/ou charge émotionnelle, il apparaît indispensable de savoir si les caractéristiques chimio-sensorielles propres à chaque produit ne sont pas elles-mêmes déjà responsables d'une réaction pupillaire. Aussi, l'étude présentée dans ce chapitre avait alors pour objectif de **rechercher systématiquement les possibles effets des principales caractéristiques chimio-sensorielles des produits alimentaires**.

La finalité de cette étude était la formulation de recommandations pour la comparaison de produits avec des caractéristiques chimio-sensorielles différentes. **Deux conclusions** étaient **possibles** pour chacun des stimuli testés :

- **en faisant varier la concentration/le niveau du stimulus, aucune différence en termes de réponse pupillaire n'est observée**

Dans ce cas, cela signifie qu'une différence de réponse pupillaire entre deux produits ne contenant pas la même concentration de la caractéristique chimio-sensorielle testée ne pourra être attribuée à cette différence de concentration. L'interprétation ne pourra être faite qu'au travers d'autres paramètres (ex : préférence, émotion, etc.).

Exemple :

La variation en concentration de sucre n'entraîne aucune différence en termes de réaction pupillaire.

Si je compare deux produits, l'un avec une concentration forte en sucre, l'autre avec une concentration faible et que ces deux produits entraînent des réponses pupillaires différentes, alors la raison de cette différence ne pourra être la concentration en sucre.

- **en faisant varier la concentration/le niveau du stimulus, la réponse pupillaire varie**

En revanche, dans ce cas cela signifie qu'une différence de réponse pupillaire entre deux produits ne contenant pas la même concentration de la caractéristique chimio-sensorielle testée devra être interprétée en mettant ces résultats en regard de ceux obtenus dans l'expérimentation rapportée dans ce chapitre. De la même manière, en l'absence de différence en termes de réponse pupillaire entre ces deux mêmes produits, un éventuel « gommage » de différence à cause de l'impact de la caractéristique chimio-sensorielle elle-même sur la réponse pupillaire devra être envisagé.

Exemple :

La variation du niveau d'amertume entraîne des différences en termes de réaction pupillaire ; plus mon produit est amer, plus la pupille dilate.

Si je compare deux produits, l'un très amer, l'autre peu amer et que ces deux produits entraînent des réponses pupillaires différentes, alors la raison de cette différence pourra être l'amertume. On mettra alors ces résultats en regard de ceux obtenus dans cette expérimentation. En revanche, si on n'observe aucune différence, on pourra envisager que le produit peu amer ait fait plus dilater pour d'autres raisons que des raisons physiologiques mais que cette différence a été masquée par la dilatation due à l'amertume sur l'autre produit.

REMARQUE : Cette expérimentation a été conduite deux fois. Une première fois dans des conditions non optimales de luminosité et de luminance ayant provoqué un artéfact. En effet, les produits (liquides) étaient présentés dans des gobelets de 10cL contenant 10mL, le sujet devait consommer la totalité du gobelet ce qui le contraignait à lever la tête. Or, l'éclairage de la salle était un éclairage au plafond, plus précisément, un bloc d'éclairage néon était situé au-dessus de la tête du sujet. Ainsi, une contraction pupillaire due à la lumière a été observée (cf explications au chapitre 3 - 1.5. Précautions à prendre et illustration sur Figure 27). L'ensemble de l'expérimentation a ainsi été reconduit dans des conditions plus optimales de luminosité et de luminance, et avec un gobelet rempli ne nécessitant pas de mouvement de tête. Dans ce chapitre, nous ne détaillerons que le traitement des nouvelles données.

2. Méthodes

2.1. Participants

25 sujets au total ont été recrutés parmi le personnel du Centre de Recherche Pernod Ricard, 7 hommes et 18 femmes, pour cinq séances au total. Aucune sélection n'a été faite sur le genre ou l'âge. Cependant, les sujets ayant eu recours à la chirurgie de la myopie ou toute autre chirurgie de l'œil ont été écartés de l'étude. Les 25 sujets ont goûté chacun l'ensemble des produits testés.

2.2. Matériel et installation

Le **matériel** utilisé était le suivant :

- Ecran Tobii d'eye tracking T60 (60Hz)
- Ordinateur portable avec le logiciel Tobii Studio
- Matériel pour la préparation des produits : balance, fioles, agitateur magnétique
- Contenants pour les produits : bouteilles de 1L en PET

Les tests ont été réalisés dans une pièce privée de la lumière du jour. Des mesures de luminosité et luminance ont mis en évidence une **luminosité** moyenne de 100 lux (mesure prise au niveau de front du sujet installé, écran allumé) et une **luminance** de l'écran de 30 cd/m².

2.3. Produits

Tout d'abord, **5 gammes de solutions aqueuses** ont été testées dans le but de rechercher les possibles effets des 5 saveurs de base :

- Une gamme de saccharose, correspondant à la saveur « sucrée »
- Une gamme de caféine, correspondant à la saveur « amère »
- Une gamme d'acide citrique correspondant à la saveur « acide »
- Une gamme de chlorure de sodium correspondant à la saveur « salée »
- Une gamme de glutamate de sodium correspondant à la saveur « umami »

Egalement, **4 gammes de solutions hydro-alcooliques** ont été testées dans le but de rechercher les possibles effets des principales sensations spécifiques des boissons alcoolisées :

- Une gamme correspondant au stimulus « sucre » (saccharose)
- Une gamme correspondant au stimulus « amertume » (quinine)
- Une gamme correspondant au stimulus « alcool » (alcool neutre à 96%)
- Une gamme correspondant au stimulus « CO₂ » (carboglace)

2.3.1. Préparation des solutions aqueuses

Pour chaque gamme, 5 concentrations ont été préparées. Les niveaux ont été déterminés en fonction des seuils de détection et de reconnaissance de chaque molécule (AFNOR, Association Française De Normalisation, 1989 ; Bowen, page consultée le 05 mai 2014 ; Hladik, Pasquet & Simmen, 2002). Le seuil de détection d'une substance est la plus petite concentration à partir de laquelle un sujet perçoit la présence d'une substance. Le seuil de reconnaissance, quant à lui, est la plus petite concentration à partir de laquelle un sujet est capable de reconnaître la substance. Le Tableau 27 rapporte ces seuils moyens et les concentrations choisies.

Tableau 27. Seuils de reconnaissance et de détection moyens pour chaque molécule et concentrations des gammes réalisées

	Seuil de		Concentration				
	détection	reconnaissance	N0	N1	N2	N3	N4
Saccharose (g.L⁻¹)	3.42	5.76	0	10	25	50	100
Caféine (g.L⁻¹)	0.16-0.23	0.19	0	0.1	0.4	0.8	1.5
Acide citrique (g.L⁻¹)	0.38	0.43	0	0.3	0.6	1.5	4
NaCl (g.L⁻¹)	0.58	1.19	0	0.5	2	10	20
Glutamate de sodium (g.L⁻¹)	0.12	0.59	0	0.1	0.8	1.5	5

Pour l'ensemble des gammes, les produits ont été préparés de la manière suivante :

1. Pesée de la quantité de matière nécessaire
2. Ajout de l'eau (Evian)
3. Mélange à l'aide d'un agitateur magnétique jusqu'à dissolution totale
4. Transvasement de la solution dans une bouteille en PET
5. Mise au réfrigérateur

Toutes les solutions ont été préparées avec de l'eau Evian et conservées dans des bouteilles en PET dans un réfrigérateur à 4°C tout au long des expérimentations.

En termes de quantité, 10 cL de chaque solution étaient donnés à boire aux sujets lors du test. Etant donné que 25 sujets ont participé à l'étude, la quantité nécessaire de chaque solution était de 2.5 L. Afin de garantir une marge de sécurité, 3 L de chaque solution ont été préparés.

2.3.2. Préparation des solutions hydroalcooliques

Pour chaque gamme, 4 à 5 niveaux ont été préparés dans une base liqueur neutre : alcool, eau et sucre. Les niveaux ont été déterminés en fonction des caractéristiques chimio-sensorielles des produits alcoolisés présents sur le marché. Les solutions de la gamme 'Alcool' ont été préparées dans une base à 10 g.L⁻¹ de sucre afin d'assouplir les solutions et plus particulièrement la solution à 40% (V/V) d'alcool sans gommer l'effet alcool. Les solutions de la gamme 'Sucre' ont été préparées dans une base à 18% d'alcool afin de correspondre à un produit commercial de type liqueur. Les solutions de la gamme 'Amertume' ont été préparées dans une base à 15% d'alcool (V/V) et 200 g.L⁻¹ de sucre afin de correspondre à un produit commercial de type apéritif amer. Les solutions de la gamme 'CO₂' ont été préparées dans une base à 12% d'alcool et 50 g.L⁻¹ de sucre afin de correspondre à un produit type vin effervescent. Le Tableau 28 rapporte la composition des différentes solutions de chaque gamme.

Tableau 28. Composition des différentes solutions de chaque gamme

	Alcool					Sucre					Amertume				CO ₂			
	N0	N1	N2	N3	N4	N0	N1	N2	N3	N4	N0	N1	N2	N3	N0	N1	N2	N3
Alcool (% V/V)	0	10	20	30	40			18				15					12	
Saccharose (g.L⁻¹)			10			0	50	100	200	300		200					50	
Quinine (mg.L⁻¹)											0	10	20	50				
CO₂(g.L⁻¹)															0	2	5	7

Remarque : En raison de manque de matériel adapté, nous ne pouvions pas préparer de produits à une concentration supérieure à 7g.L⁻¹ de CO₂.

L'alcool utilisé était de l'alcool à 96%, le volume nécessaire pour atteindre les titres alcoométriques volumiques (TAV) précédemment cités a été calculé selon la formule suivante :

$$Vm = \frac{Vf \times Cf}{Cm}$$

Avec :

V_m : Volume de solution mère (à définir)

V_f : Volume de solution fille (1000 mL)

C_m : Concentration de solution mère (96%)

C_f : Concentration de solution fille (cf. Tableau 28)

Les volumes de solution mère obtenus pour 1L sont rapportés dans le Tableau 29.

Tableau 29. Volumes d'alcool en mL à ajouter pour chacune des solutions

	Alcool					Sucre					Amertume				CO ₂			
	N0	N1	N2	N3	N4	N0	N1	N2	N3	N4	N0	N1	N2	N3	N0	N1	N2	N3
Alcool (mL)	0	104	208	313	417			188				156					125	

Pour plus de précision, les volumes ont été convertis en poids (densité de l'alcool à 96% : 0.807). Le Tableau 30 rapporte les quantités d'alcool pour chacune des solutions en grammes.

Tableau 30. Quantité d'alcool en grammes à ajouter pour chacune des solutions

	Alcool					Sucre					Amertume					CO ₂			
	N0	N1	N2	N3	N4	N0	N1	N2	N3	N4	N0	N1	N2	N3	N0	N1	N2	N3	
Alcool (g)	0	84	168	252	336			151					126				101		

Pour l'ensemble des gammes, les solutions ont été préparées de la manière suivante :

1. Pesée de la quantité de sucre/de quinine nécessaire
2. Ajout de l'eau (quantité suffisante pour dissoudre le sucre/la quinine mais en laissant suffisamment d'espace pour les autres ingrédients)
3. Mélange à l'aide d'un agitateur magnétique jusqu'à dissolution totale du sucre/de la quinine
4. Ajout de l'alcool (à peser)
5. Ajustement du niveau avec de l'eau
6. Mise en chambre à 20°C quelques heures
7. Ajustement à nouveau du niveau
8. Transvasement de la solution dans une bouteille en PET
9. Ajout de CO₂ pour la gamme CO₂
10. Mise au réfrigérateur

Toutes les solutions ont été préparées avec de l'eau Evian et conservées dans des bouteilles en PET dans un réfrigérateur à 4°C tout au long des expériences.

Comme pour les solutions aqueuses, en termes de quantité, 10 cL de chaque solution étaient donnés à boire aux sujets lors du test et 25 sujets ont participé à l'étude, soit une quantité nécessaire de chaque solution de 2.5 L, arrondie à 3 L pour garantir une marge de sécurité.

2.4. Procédure

L'étude était divisée en 5 séances :

- Solutions aqueuses sucrées + solutions aqueuses amères
- Solutions aqueuses acides + solutions aqueuses salées
- Solutions aqueuses umami
- Solutions hydro-alcooliques CO₂ + Solutions hydro-alcooliques Alcool
- Solutions hydro-alcooliques sucrées + Solutions hydro-alcooliques amères

Les solutions d'une même gamme étaient toujours présentées dans le même ordre, à savoir, par ordre croissant d'intensité. Egalement, les 2 gammes de chaque séance étaient toujours présentées dans le même ordre, à savoir sucre puis amertume, acide puis salé, CO₂ puis alcool, la saveur umami était présentée seule. Un ordre croissant d'intensité a été choisi pour limiter l'effet de rémanence. Les ordres

entre les 2 gammes ont été choisis de manière à ce que le produit le plus rémanent soit en deuxième. En revanche, les séances étaient randomisées.

Les solutions étaient présentées au sujet dans des gobelets de 10cL remplis complètement et le sujet avait comme consigne de mettre en bouche l'équivalent d'une gorgée. Pour les solutions aqueuses, le sujet était invité à mettre en bouche le produit, pour les solutions hydro-alcooliques, le sujet recrachait.

La procédure de mesure se déroulait en 3 étapes : une **phase de repos** de 5s pour la mesure de la ligne de base, une **phase de dégustation** de 20s, pour l'enregistrement de la réponse pupillaire consécutive à la dégustation des solutions et enfin une **phase de - crachage et - rinçage** de 30s (Figure 34).

Le test se déroulait, comme décrit dans le chapitre 3, en 4 étapes :

1. **Installation du sujet et explication de la séance.**

Le sujet était installé à environ 60 cm de l'écran.

Afin de minimiser la sollicitation des yeux, des consignes identiques pour tous les sujets lui étaient lues :

« Vous allez participer à une séance visant à voir la réaction de vos yeux lorsque vous buvez différentes solutions. Durant toute la séance je vais vous distribuer différentes solutions liquides, vous n'avez pas besoin de les regarder. Durant la séance vont se succéder phase de repos, de dégustation et une phase de - crachage (pour les solutions hydroalcooliques uniquement) et - rinçage. Pendant chaque phase de repos ainsi qu'avant et pendant chaque phase de dégustation il sera important de garder les yeux sur l'écran. Il s'agira d'un écran gris avec une croix noire. L'équivalent d'une gorgée devra être ingéré (puis recraché – dans le cas des solutions hydroalcooliques), et ceci en continuant de regarder l'écran. Seule pendant la phase de rinçage vous aurez la liberté de ne pas fixer l'écran. Durant cette phase, vous serez invité à prendre de l'eau afin de vous rincer la bouche. Cette phase vous sera indiquée à l'écran et durera 30s environ, je vous indiquerai le moment du retour en phase de repos. Avez-vous des questions ? Nous allons maintenant commencer par la calibration de l'appareil puis nous réaliserons un essai blanc avec de l'eau avant de passer au test. »

2. **Calibration** de l'eye-tracker.

3. **Essais** à blanc.

4. **Mesures.**

Une fois la calibration réalisée et les instructions comprises par le sujet, le test peut démarrer. Au bout de 3s (phase de repos), le premier gobelet est tendu au sujet.

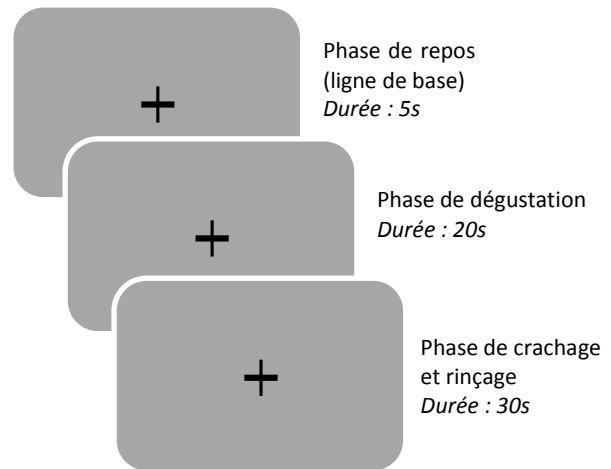


Figure 34. Procédure de l'expérimentation

2.5. Analyse des données

Les données ont tout d'abord été extraites comme rapporté dans le chapitre 3 (2.1. Extraction des données) de 1s avant stimulus pour permettre le calcul de la ligne de base à 2,5s après stimulus pour l'étude de la réaction spécifique au stimulus.

Nos expérimentations n'ont pas toutes été conduites dans des conditions expérimentales optimales. Aussi, pour le nettoyage des données, nous avons fait le choix de ne pas prendre le seuil de 18% de valeurs manquantes cité dans le chapitre 3 (cf 1.1. Participants) mais plutôt de recalculer ce seuil en fonction de l'ensemble de nos données. Ceci permet notamment d'avoir un seuil identique pour toutes nos expérimentations. Nous avons donc calculé la qualité des données de toutes ces expérimentations et tracé, comme expliqué dans le chapitre 3, le pourcentage d'enregistrements sous des seuils fixes successifs de valeurs manquantes de 0 à 100%. Le point d'inflexion a cette fois-ci été observé à 35% ; 74% des enregistrements avaient moins de 35% de valeurs manquantes. Le seuil de valeurs manquantes a donc été fixé pour l'ensemble de nos expérimentations, à 35%. Aussi, pour toutes les expérimentations rapportées dans cette thèse, **les enregistrements avec plus de 35% de valeurs manquantes ont été exclus des analyses** (pour cette expérimentation, 18.7%).

Ensuite, les **réactions pupillaires** ont été **comparées entre les différentes concentrations de chaque gamme**. Pour chaque comparaison on a pris garde à ce que les signaux comparés soient récupérés à partir des mêmes sujets. A savoir, lorsque les données d'un sujet étaient exclues sur un des produits comparés alors ce sujet était exclu de l'analyse. Ceci permet d'éliminer le bruit dû aux variations inter-individuelles.

Une **correction de la ligne de base** a été appliquée telle que définie dans le chapitre 3 (3. Traitement de données) pour chacune des solutions et les données ont été exprimées en pourcentage de variation. Egalement, les différentes méthodes rapportées dans ce même chapitre, à savoir, le **tracé des courbes**, la **comparaison des pics de dilatation**, la **comparaison temps par temps** et l'**ACP** (lorsqu'elle était appropriée) ont été appliquées telles qu'elles ont été définies.

Enfin, **les gammes et niveaux de chaque ensemble de solutions** (aqueuses et hydroalcooliques) ont été **comparés entre eux**. Pour cela, les pics de dilatation de chaque niveau de chaque gamme pour chaque sujet ont été récupérés et soumis à une analyse de la variance à 2 facteurs, gamme et niveau avec interaction gamme * niveau. Pour les solutions hydroalcooliques les gammes sucrée et alcool comportant un niveau de plus que les gammes amère et CO₂, leur niveau 3 a été supprimé et le niveau 4, renommé niveau 3. Cela permet de conserver la plage de variation.

3. Résultats

3.1. Solutions aqueuses

3.1.1. Gamme sucrée

La Figure 35 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 21 sujets retenus lors de la comparaison des différents niveaux de la gamme sucrée.

La Figure 35 (a) rapporte l'évolution du **pourcentage de variation** par rapport à la ligne de base calculée à partir des 200 dernières millisecondes avant la mise en bouche pour chacun des 5 niveaux de la gamme sucrée dans une fenêtre de 2,5s après mise en bouche. On constate une dilatation pour tous les niveaux avec un pic de dilatation entre 1200 et 1400 ms, y compris pour le niveau 0 qui correspond à l'eau. Cependant, nous ne remarquons pas de hiérarchie quant à l'amplitude de dilatation par rapport aux niveaux. Le **pic de dilatation** défini comme la valeur maximale entre 0 et 2,5s après mise en bouche du produit a été calculé pour chaque niveau et chaque sujet pour être soumis à une analyse de variance 2 facteurs, sujet et niveau. Les résultats ne révèlent pas d'effet niveau, le pic de dilatation était équivalent pour les 5 niveaux de la gamme [$F(4,80) = 1,51$, ns] (Figure 35 (b)). Enfin, la Figure 35 (c) rapporte les résultats de la **comparaison temps par temps** sur moyennes mobiles calculées dans une fenêtre de temps de 0 à 2,5s. Une différence apparaît à la fin du signal seulement, le diamètre pupillaire pour le niveau 0, lors du retour à la ligne de base, « dépasse » le diamètre initial contrairement aux 4 autres niveaux.

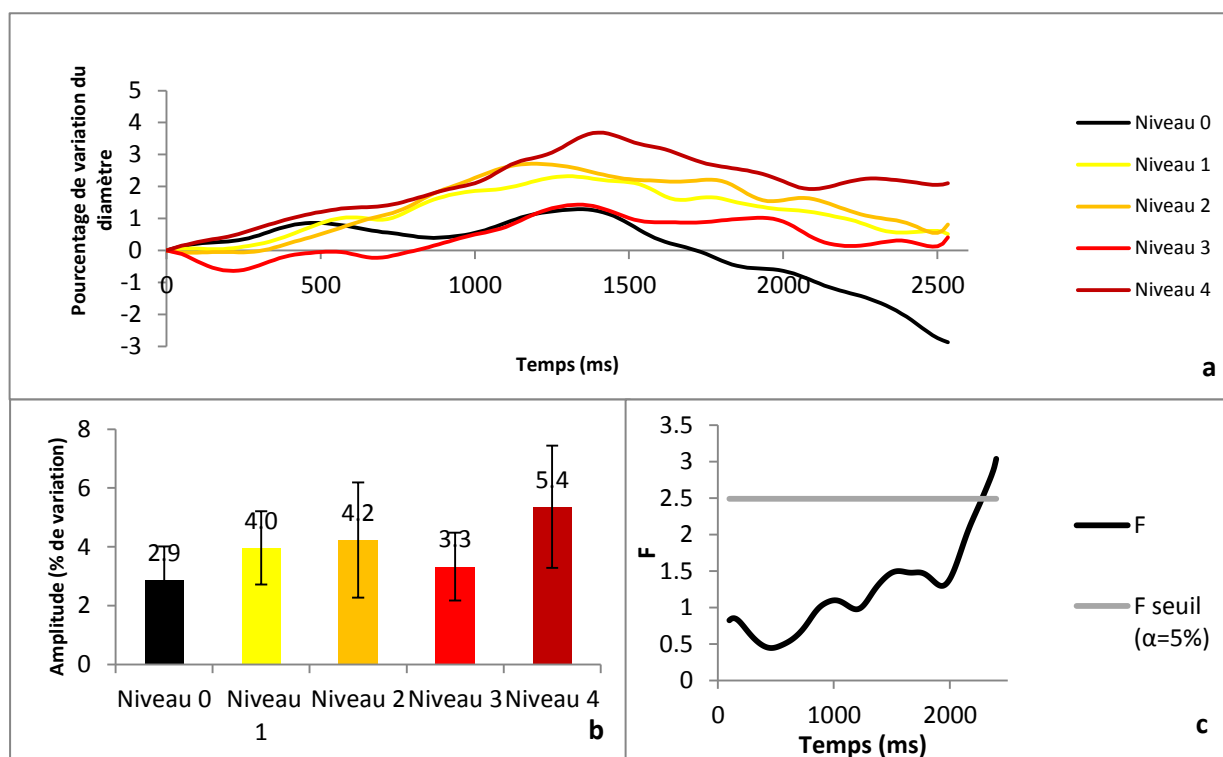


Figure 35. Résultats de la comparaison de la dilation pupillaire pour les 5 niveaux de la gamme sucrée des solutions aqueuses

(Concentrations en sucre : N0 : 0g.L⁻¹, N1 : 10g.L⁻¹, N2 : 25g.L⁻¹, N3 : 50g.L⁻¹, N4 : 100g.L⁻¹)

- (a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base
- (b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)
- (c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur niveau en fonction du temps

➔ **Conclusion :** Une dilatation pupillaire a été observée pour l'ensemble des solutions de la gamme sucrée. Cependant, aucune différence n'a été notée en termes d'amplitude de réaction ; le pic de dilatation a été équivalent pour les 5 solutions. Seule une différence sur la fin du signal entre l'eau (niveau 0) et les solutions sucrées (niveaux 1 à 4) a été observée lors de la comparaison temps par temps ; consécutivement à la dilatation provoquée par l'ingestion de l'eau (niveau 0), le retour à la ligne de base a « dépassé » le diamètre initial, ce qui n'a pas été le cas pour les 4 autres niveaux. Cependant, ce qui nous intéresse, c'est la réaction spécifique directe au produit et non le retour à la ligne de base, nous ne tiendrons donc pas compte de cette différence. La gamme appliquée couvrait une plage de variation relativement large puisque les concentrations allaient de 0 à 100g.L⁻¹. En conclusion on peut donc dire que des produits avec des concentrations en sucre variées peuvent être comparés entre eux sans prise en compte du facteur sucre.

3.1.2. Gamme amère

La Figure 36 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 23 sujets retenus lors de la comparaison des différents niveaux de la gamme amère.

L'évolution du pourcentage de variation pour chacun des 5 niveaux montre une réponse pupillaire faible pour le niveau 1, intermédiaire pour le niveau 2 et plus importante pour les 2 concentrations les plus fortes (niveaux 3 et 4). Les réactions pupillaires pour les niveaux 3 et 4 paraissent semblables (Figure 36 (a)). Il semblerait à première vue que plus la concentration en caféine est importante plus la pupille dilate. Cependant, le niveau 0 (eau) provoque une dilatation pupillaire intermédiaire entre les concentrations les plus faibles et les concentrations les plus fortes, ce qui ne va pas dans le sens de cette hypothèse. Il est possible que cela soit dû au fait que la gamme amère est testée juste après la gamme sucrée. Les solutions étant présentées par ordre croissant d'intensité, on peut imaginer que les sujets s'attendent à une solution sucrée, la surprise de n'avoir que de l'eau a pu provoquer une dilatation plus importante. On observe ensuite les **pics de dilatation** moyens observés pour chacune des solutions (Figure 36 (b)). Comme nous l'avons observé sur les courbes d'évolution, de manière étonnante, on retrouve un pic de dilatation relativement élevé pour le niveau 0. Ensuite, les pics de dilatation augmentent progressivement du niveau 1 au niveau 3 puis diminuent au niveau 4 ; il s'agit certainement d'un effet de saturation. L'effet de la concentration en caféine est confirmé par l'analyse de la variance à 2 facteurs, sujet et niveau, des pics de dilatation calculés pour chaque niveau et chaque sujet [$F(4, 88) = 2.42$, $p = 0.054$, $\eta^2 = 0.07$] ; les pics de dilatation des niveaux 3 et 4 étaient significativement supérieurs à celui du niveau 1. Enfin, la Figure 36 (c) rapporte les résultats de la **comparaison temps par temps** sur moyennes mobiles. Les résultats ont révélé des réponses pupillaires différentes sur la période de 550 à 850ms, pendant la phase de dilatation. Une ACP a été réalisée sur cette période. Une seule composante a été retenue, celle-ci traduisait le signal moyen ($R = 0.85$, $p < 0.001$). Cette composante discrimine de manière significative les différents niveaux [$F(4, 88) = 4.12$, $p = 0.028$, $\eta^2 = 0.04$] ; les résultats rejoignent ceux des pics de dilatation, le signal moyen de 550 à 850ms était plus important pour les niveaux 3 et 4 que pour le niveau 1. Ceci traduit une vitesse de dilatation plus importante pour les niveaux 3 et 4, le pic de dilatation plus important est atteint en même temps que pour les autres niveaux.

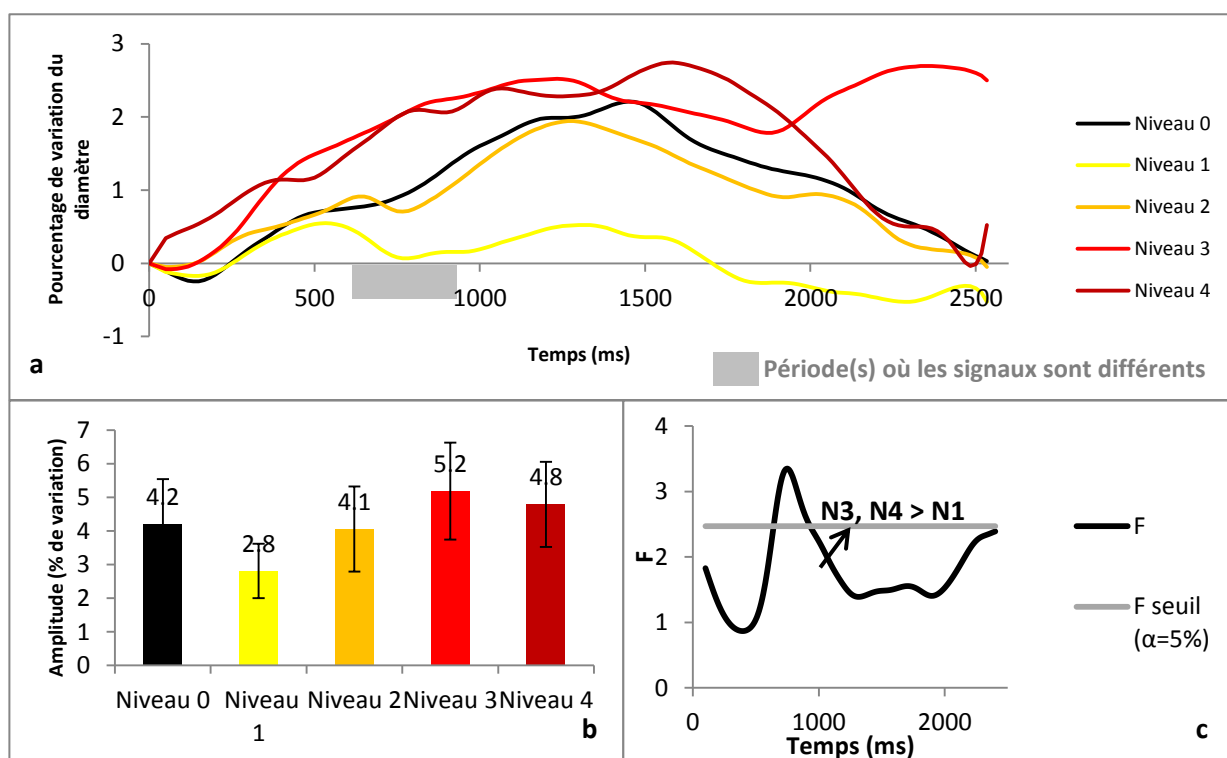


Figure 36. Résultats de la comparaison des 5 niveaux de la gamme amère des solutions aqueuses (Concentrations en caféine : N0 : 0g.L^{-1} , N1 : $0,1\text{g.L}^{-1}$, N2 : $0,4\text{g.L}^{-1}$, N3 : $0,8\text{g.L}^{-1}$, N4 : $1,5\text{g.L}^{-1}$)

- (a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base
- (b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre niveaux - 2 niveaux n'ayant aucune lettre en commun entraînent un pic de dilatation différent)
- (c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur niveau en fonction du temps

→ Conclusion : Globalement, plus la solution est amère, plus la pupille dilate. Nous avons pour ce test une gamme de solution couvrant une plage de variation allant de 0 à $1,5\text{g.L}^{-1}$. A titre comparatif, le café expresso a une concentration moyenne en caféine de $0,56\text{g.L}^{-1}$ et le chocolat noir contient l'équivalent de $0,86\text{g.L}^{-1}$ de caféine (31mg de caféine pour une portion de 43g ; le chocolat noir du commerce a une densité de 1,2). La réponse pupillaire a été maximale à une concentration de $0,8\text{g.L}^{-1}$, ce qui ne se retrouvera pas dans la majorité des produits mais notons tout de même que lors d'une amertume prononcée dans un produit, il sera nécessaire de prendre cette variable en considération. Cependant attention, il s'agissait ici de solutions aqueuses et non de produits complexes. Les solutions à forte concentration étaient particulièrement rejetées par les sujets. La dilatation peut être due à ce rejet du produit plutôt qu'à une réaction à la saveur elle-même

7.1.1. Gamme acide

La Figure 37 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 20 sujets retenus lors de la comparaison des différents niveaux de la gamme acide.

L'évolution du **pourcentage de variation** pour chacun des 5 niveaux de la gamme montre, comme pour les solutions amères, une réponse pupillaire plus importante pour les concentrations les plus fortes (Figure 37 (a)). L'analyse de la variance à 2 facteurs, sujet et niveau, des **pics de dilatation** calculés pour chaque niveau et chaque sujet confirme un effet niveau [$F(4,76) = 3.24$, $p = 0.016$, $\eta^2 = 0.11$] ; le pic de dilatation observé pour le niveau 3 était supérieur à ceux observés pour les niveaux 0, 1 et 2 et le pic de dilatation observé pour le niveau 4 était supérieur à celui observé pour le niveau 0 (Figure 37 (b)). Nous observons cette fois, une dilatation pour le niveau 0 (eau) moins importante que pour la gamme amère ce qui va dans le sens de notre précédente hypothèse puisque cette fois-ci le niveau 0 est la première solution présentée lors de la séance. Enfin, les résultats de la **comparaison temps par temps** révèlent des réponses pupillaires différentes sur la période de 1800 à 2300ms, pendant la phase de retour à la ligne de base (Figure 37 (c)). Une ACP a été réalisée sur cette période. Une seule composante a été retenue, celle-ci traduisait le signal moyen ($R = 0.99$, $p < 0.001$). Cette composante discrimine de manière significative les différents niveaux [$F(4, 76) = 2.78$, $p = 0.032$, $\eta^2 = 0.08$] ; le pourcentage de variation moyen était plus fort pour les niveaux 3 et 4 que pour le niveau 0. Cela traduit une dilatation pupillaire plus soutenue pour ces deux niveaux.

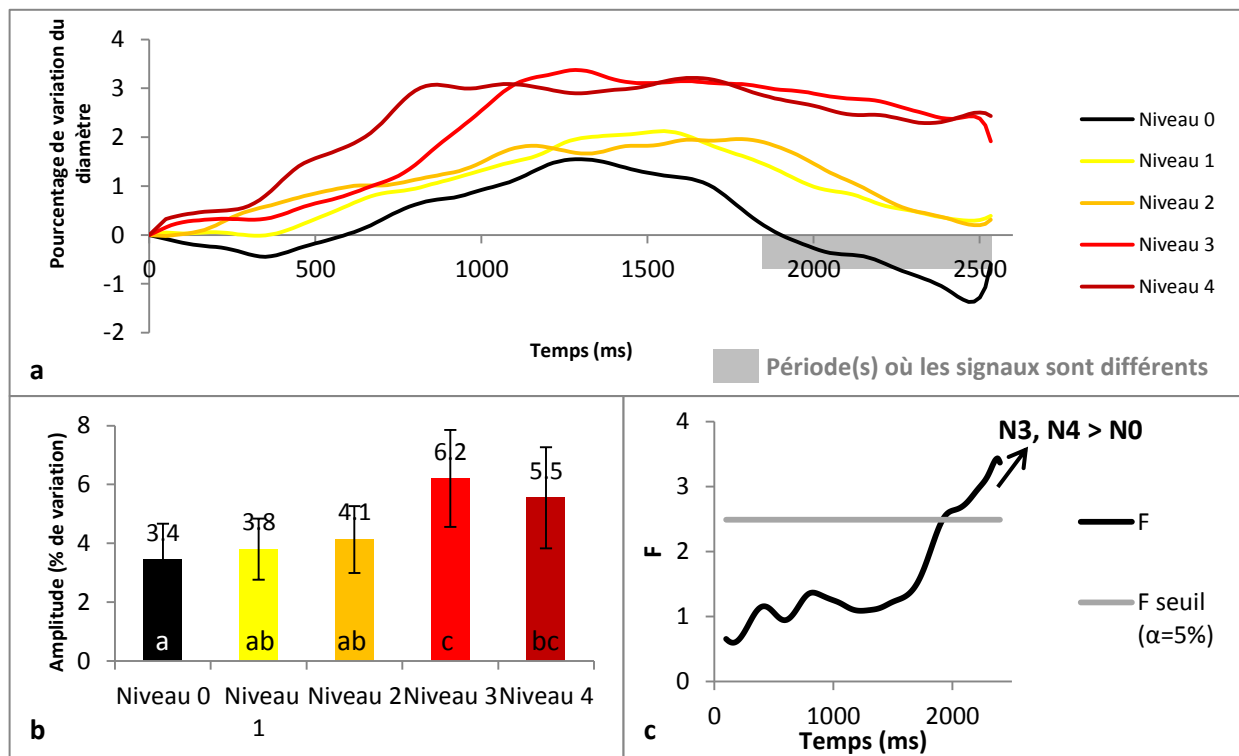


Figure 37. Résultats de la comparaison des 5 niveaux de la gamme acide des solutions aqueuses (Concentrations en acide citrique : N0 : 0g.L⁻¹, N1 : 0,3g.L⁻¹, N2 : 0,6g.L⁻¹, N3 : 1,5g.L⁻¹, N4 : 4g.L⁻¹)

(a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base

(b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre niveaux - 2 niveaux n'ayant aucune lettre en commun entraînent un pic de dilatation différent)

(c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur niveau en fonction du temps

→ **Conclusion : De la même manière que pour les solutions amères, plus la solution est acide, plus la pupille dilate, jusqu'à un effet de saturation dû au fait que les concentrations sont présentées par ordre croissant d'intensité. Aussi, lors de la comparaison de produits avec différentes acidités, la prise en compte du facteur acide sera nécessaire.**

3.1.3. Gamme salée

La Figure 38 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 17 sujets retenus lors de la comparaison des différents niveaux de la gamme salée.

Comme pour les deux précédentes gammes, l'**évolution du pourcentage de variation** rapportée dans Figure 38(a) montre une réponse pupillaire plus importante pour les concentrations les plus fortes. En termes de **pic de dilatation** (Figure 38 (b)), nous retrouvons une amplitude de réaction pour l'eau (4.3%) similaire à celle observée pour la gamme amère (4.2%). Une nouvelle fois, cela va dans le sens de l'hypothèse de la surprise puisqu'elle est présentée ici après la concentration la plus forte de la gamme acide. Cependant ici, cette forte dilatation apparaît moins car la dilatation consécutive à l'ingestion des solutions salées est plus importante que celle consécutive à l'ingestion des solutions amères. De plus, une nouvelle fois, il semblerait que les plus fortes concentrations entraînent une plus forte dilatation. L'analyse de la variance à 2 facteurs, sujet et niveau, des pics de dilatation confirme l'effet niveau [$F(4,64) = 4.56$, $p = 0.003$, $\eta^2 = 0.17$] ; le pic de dilatation était plus important pour le niveau 3 que pour les niveaux 0, 1 et 2 et le pic de dilatation du niveau 4 était plus important que celui du niveau 1. Enfin, les résultats de la **comparaison temps par temps** révèlent des réponses pupillaires différentes sur 2 périodes, de 600 à 1000ms, pendant la phase de dilatation et de 1600 à 1950ms, pendant le retour à la ligne de base (Figure 38 (c)). Une ACP a été réalisée sur chacune de ces 2 périodes. Une seule composante a été retenue à chaque fois, celle-ci traduisait le signal moyen ($R = 0.99$, $p < 0.001$; mêmes résultats pour les 2). Cette composante a discriminé de manière significative les différents niveaux [respectivement, $F(4, 64) = 2.70$, $p = 0.038$, $\eta^2 = 0.12$ et $F(4, 64) = 2.80$, $p = 0.033$, $\eta^2 = 0.09$] ; le pourcentage de variation moyen était plus fort pour le niveau 3 que pour les niveaux 0, 1 et 2 sur la période de 600 à 1000ms et plus fort pour le niveau 3 que pour les niveaux 0 et 1 pour la période de 1600 à 1950ms. La dilatation pupillaire est plus rapide et plus soutenue pour le niveau 3.

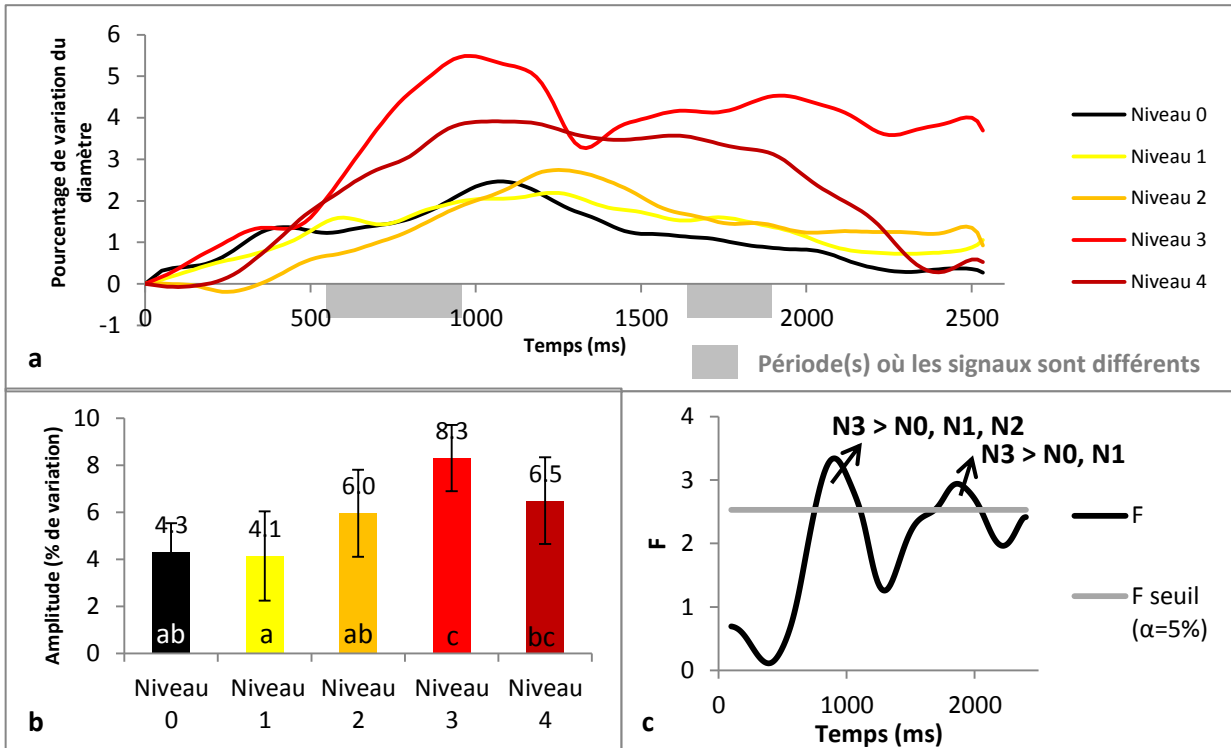


Figure 38. Résultats de la comparaison des 5 niveaux de la gamme salée des solutions aqueuses (Concentrations en chlorure de sodium : N0 : $0g.L^{-1}$, N1 : $0,5g.L^{-1}$, N2 : $2g.L^{-1}$, N3 : $10g.L^{-1}$, N4 : $20g.L^{-1}$)

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base*
 (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre niveaux - 2 niveaux n'ayant aucune lettre en commun entraînent un pic de dilatation différent)*
 (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur niveau en fonction du temps*

➔ **Conclusion :** Une nouvelle fois, plus la concentration est forte, plus la pupille dilate, jusqu'à un effet de saturation. Il semble donc nécessaire de prendre en considération le facteur sel lors de la comparaison de produits avec différents niveaux de sel. Cependant comme pour les solutions amères, les produits étaient fortement rejetés, les sujets avaient l'impression de « boire la tasse » pour les fortes concentrations. Cela peut également être responsable de la forte dilatation pupillaire.

3.1.4. Gamme umami

La Figure 39 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 17 sujets retenus lors de la comparaison des différents niveaux de la gamme umami.

On observe sur la Figure 39 (a) rapportant l'évolution du pourcentage de variation, une dilatation pupillaire pour l'ensemble des solutions autour de 1200ms qui cette fois-ci semblerait chaque fois équivalente. En effet, l'analyse de la variance à 2 facteurs, sujet et niveau, des pics de dilatation ne révèle aucun effet niveau [$F(4,64) = 0.08$, $p = 0.987$] (Figure 39 (b)). Notons ici que le pic de dilatation pour

l'eau est à 4.2%, or cette fois-ci aucune autre solution n'était présentée avant. Ceci ne confirme pas notre hypothèse de la surprise. Enfin, ces observations sont à nouveau confirmées par la **comparaison temps par temps** de laquelle ne ressort aucune différence (Figure 39 (c)).

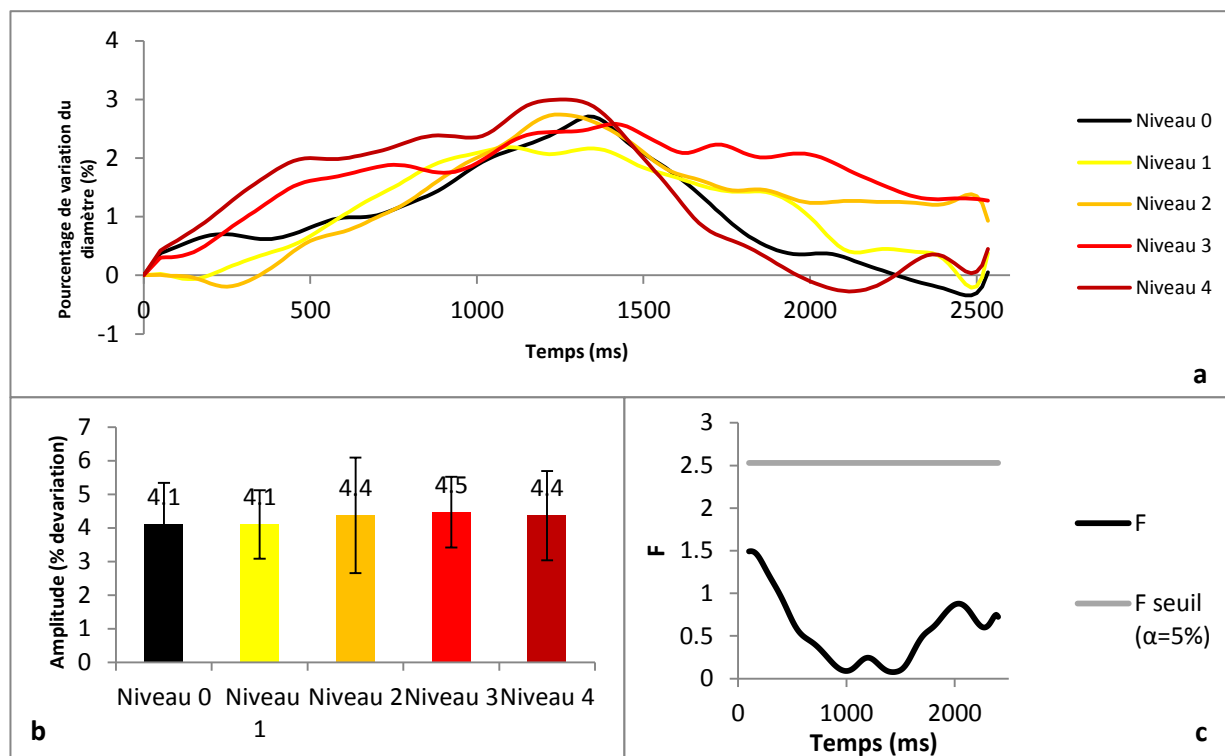


Figure 39. Résultats de la comparaison des 5 niveaux de la gamme umami des solutions aqueuses (Concentrations en glutamate de sodium : N0 : 0g.L⁻¹, N1 : 0,1g.L⁻¹, N2 : 0,8g.L⁻¹, N3 : 1,5g.L⁻¹, N4 : 5g.L⁻¹)

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur niveau en fonction du temps*

→ Aucune différence de dilatation de la pupille n'a été notée entre l'ensemble des solutions de la gamme umami nous laissant conclure que la comparaison de produits avec des niveaux en umami variables ne posent pas de problème.

3.1.5. Comparaison des 5 gammes entre elles

Les pics de dilatation de chaque niveau de chaque gamme pour chaque sujet ont été récupérés et soumis à une analyse de la variance à 2 facteurs, gamme et niveau avec interaction gamme * niveau. Les résultats révèlent un effet gamme [$F(4,443) = 6.08$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.040$], les solutions salées entraînent une dilatation plus importante que les autres solutions et les solutions acides une dilatation plus importante que les solutions sucrées. Egalement, on retrouve l'effet niveau [$F(4,443)=7.15$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.05$] et une tendance pour l'interaction gamme * niveau [$F(16,443) = 1.45$, $p = 0.115$] dû au fait qu'il

n'y a un effet niveau que sur 3 gammes sur 5. La Figure 40 rapporte les pics de dilatations moyens observés par gamme (niveau 0 non compris).

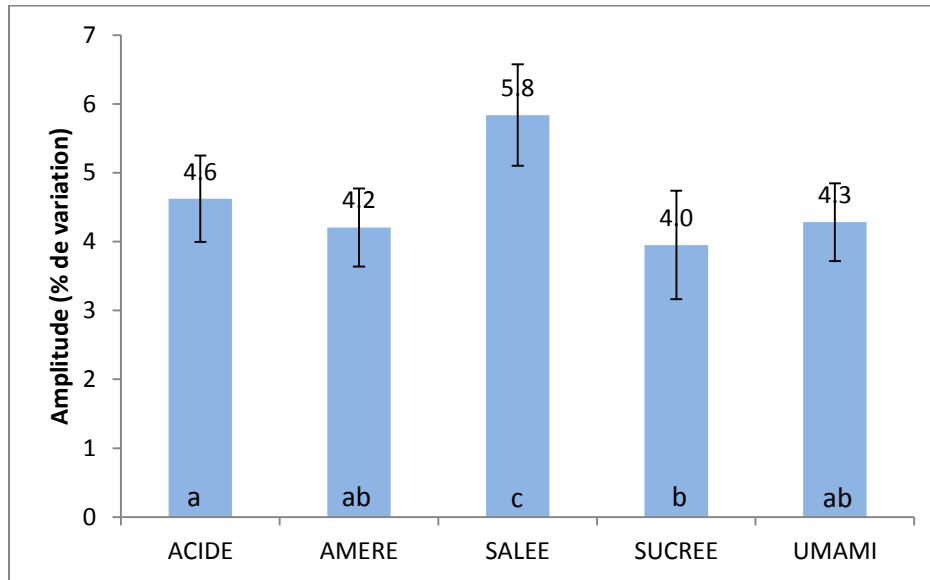


Figure 40. Pics de dilatation moyens de chaque gamme de solutions aqueuses

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre niveaux - 2 niveaux n'ayant aucune lettre en commun entraînent un pic de dilatation différent)

3.2. Solutions hydro-alcooliques

3.2.1. Gamme sucrée

La Figure 41 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 24 sujets retenus lors de la comparaison des différents niveaux de la gamme sucrée des solutions hydro-alcooliques.

Une dilatation pupillaire est observable sur les courbes d'**évolution du pourcentage de variation** pour l'ensemble des solutions autour de 1200ms (Figure 41 (a)). Si on exclut l'inversion entre les niveaux 2 et 3, il semblerait que plus la concentration est forte, plus la pupille dilate. Les résultats de l'analyse de variance à 2 facteurs, sujet et niveau, des **pics de dilatation** ne confirment pas cette observation puisqu'elle ne met en évidence aucun effet niveau [$F(4,92)=1.25$, $p=0.295$] (Figure 41 (b)). De la même manière, la **comparaison temps par temps** dont les résultats sont rapportés par Figure 41 (c) ne met en évidence aucune différence entre les différents niveaux. Notons tout de même que nous sommes proches de la significativité vers 1700ms.

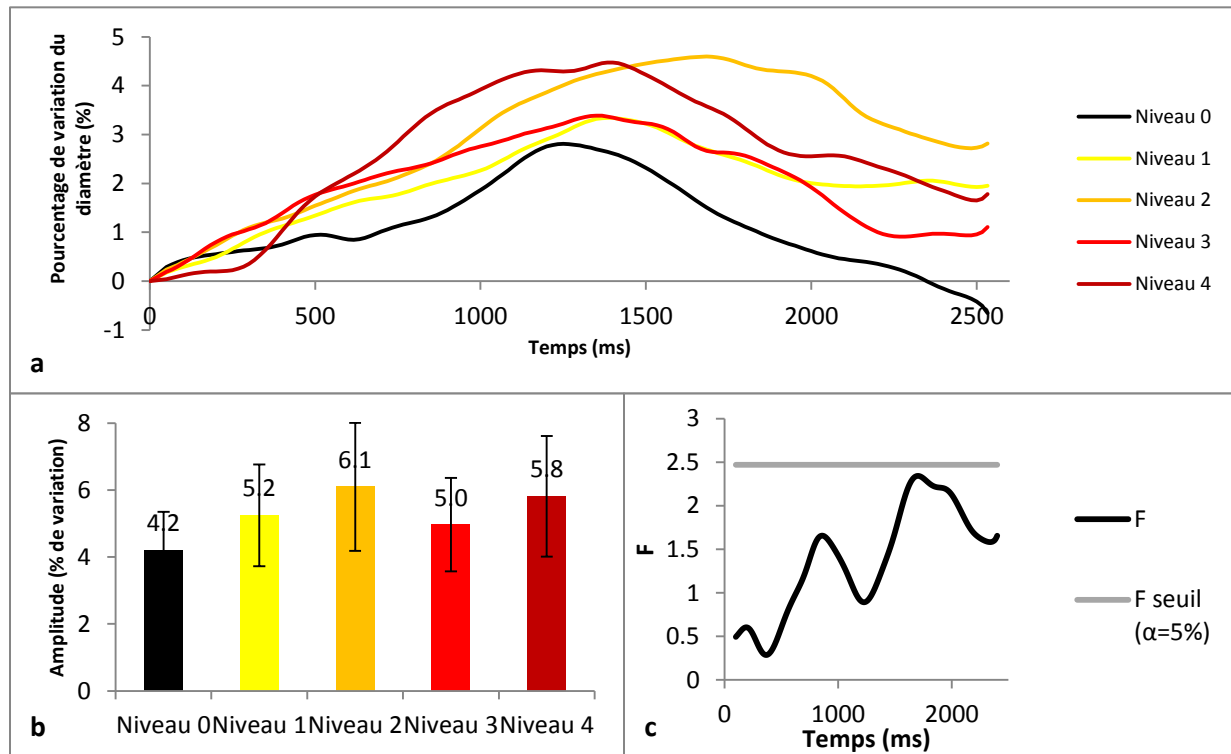


Figure 41. Résultats de la comparaison des 5 niveaux de la gamme sucrée des solutions hydro-alcooliques

(Concentrations en saccharose : N0 : 0g.L^{-1} , N1 : 50g.L^{-1} , N2 : 100g.L^{-1} , N3 : 200g.L^{-1} , N4 : 300g.L^{-1})

(a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base

(b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

(c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur niveau en fonction du temps

➔ Les différentes solutions hydro-alcooliques de la gamme sucrée entraînent une dilatation pupillaire équivalente. Cela rejoint les conclusions sur les solutions aqueuses. Globalement, des produits, qu'ils soient alcoolisés ou non, variant en concentration de sucre peuvent ainsi être comparés entre eux.

3.2.2. Gamme amère

La Figure 42 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 24 sujets retenus lors de la comparaison des différents niveaux de la gamme amère.

Comme pour la gamme sucrée, une dilatation pupillaire est observable sur les courbes d'**évolution du pourcentage de variation** pour l'ensemble des solutions autour de 1200ms. La solution du niveau 3 est la solution entraînant la plus grande dilatation (Figure 42 (a)). L'étude des **pics de dilatation** au travers d'une analyse de la variance à 2 facteurs, sujet et niveau, ne révèle pas d'effet niveau [$F(3,69) = 1.15$, $p = 0.333$] ; les pics de dilatation étaient équivalents pour les 4 niveaux testés (Figure 42 (b)). Enfin, on confirme ces résultats par la **comparaison temps par temps** rapportée par la Figure 42 (c) qui ne met en évidence aucune différence entre les 4 solutions.

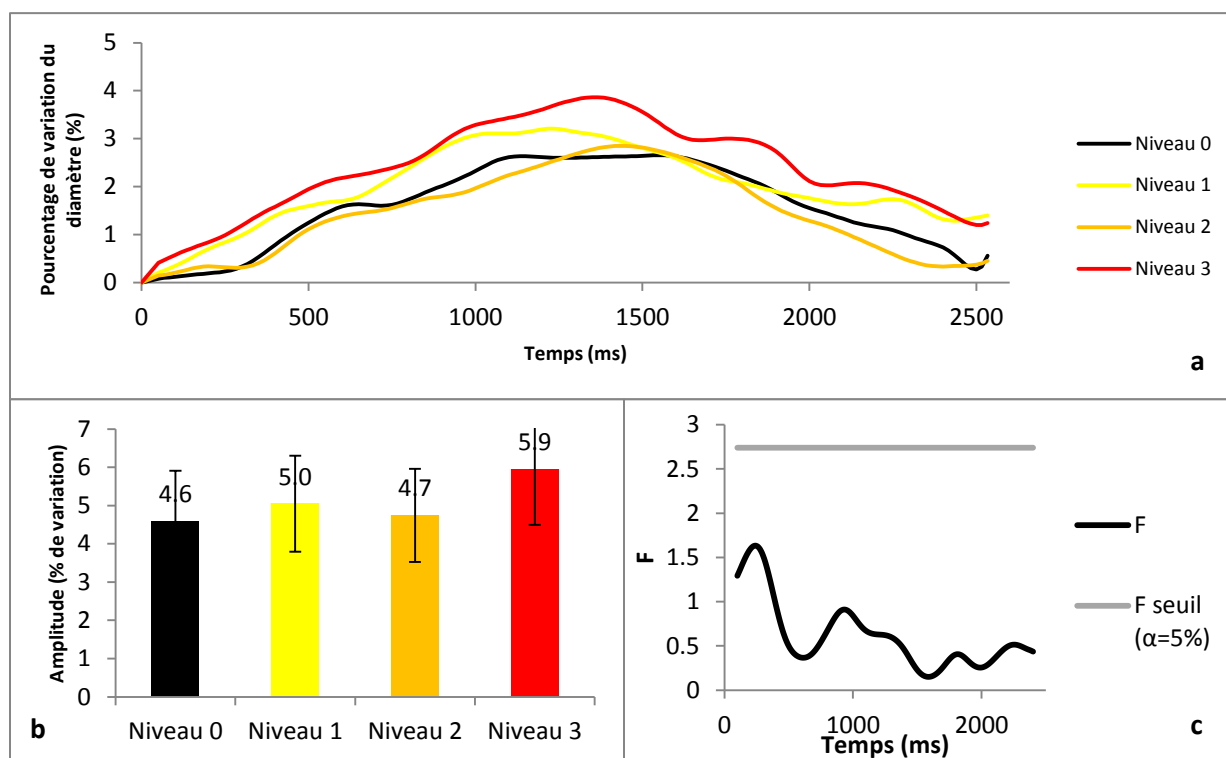


Figure 42. Résultats de la comparaison des 5 niveaux de la gamme amère des solutions hydro-alcooliques

(Concentrations en quinine : N0 : 0mg.L⁻¹, N1 : 10mg.L⁻¹, N2 : 20mg.L⁻¹, N3 : 50mg.L⁻¹)

(a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base

(b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

(c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur niveau en fonction du temps

➔ Contrairement aux solutions aqueuses, les différentes solutions hydro-alcooliques de la gamme amère entraînent une dilatation pupillaire équivalente. Il semblerait ainsi que l'effet amertume, soit supprimé par l'alcool. On peut ainsi conclure que des produits alcoolisés (au moins 15% d'alcool (V/V) selon nos observations) variant en amertume peuvent être comparés entre eux.

3.2.3. Gamme CO₂

La Figure 43 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 22 sujets retenus lors de la comparaison des différents niveaux de la gamme CO₂.

De manière étonnante, on observe sur le tracé de l'évolution du **pourcentage de variation** rapporté dans la Figure 43 (a), une dilatation plus importante pour les niveaux les plus faibles. Cependant, l'étude des **pics de dilatation** montre que le niveau de concentration en CO₂ n'a pas d'influence sur le diamètre pupillaire [$F(3,63)=1.82$, $p=0.153$] (Figure 43 (b)). De la même manière, la **comparaison temps par temps** ne met en évidence aucune différence (Figure 43 (c)).

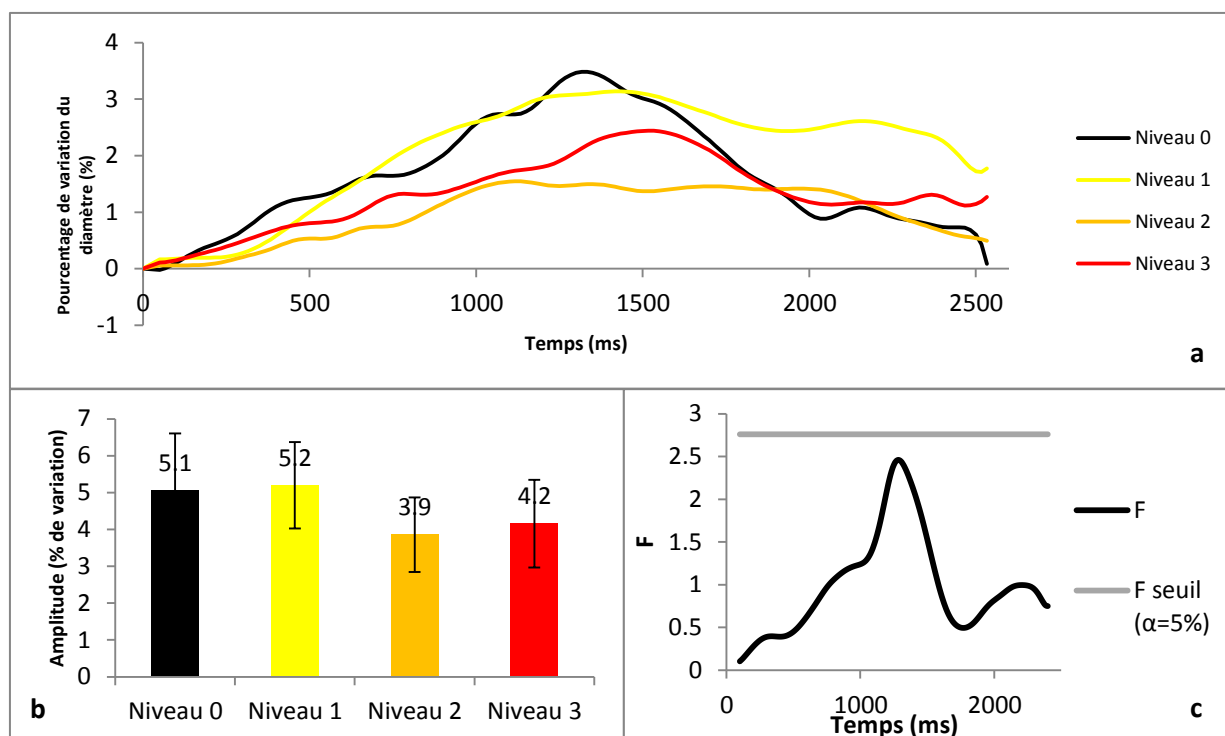


Figure 43. Résultats de la comparaison des 5 niveaux de la gamme CO₂ des solutions hydro-alcooliques

(Concentrations en CO₂ : N0 : 0g.L⁻¹, N1 : 2g.L⁻¹, N2 : 5g.L⁻¹, N3 : 7g.L⁻¹)

(a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base

(b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

(c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur niveau en fonction du temps

→ Les différentes solutions de la gamme CO₂ entraînent une dilatation pupillaire équivalente. Il semblerait ainsi que des produits alcoolisés effervescents peuvent être comparés sans prise en compte du facteur « pétillant ». Cependant, attention, comme nous l'avons précisé plus haut, nous n'avons pas pu préparer de solution à plus de 7g.L⁻¹ et ainsi la plage de variation de la gamme CO₂ ne couvrirait pas les concentrations retrouvées dans les produits du marché ; le champagne contient par exemple environ 10g.L⁻¹ de CO₂. Ceci reste donc à confirmer sur de plus fortes concentrations.

3.2.4. Gamme Alcool

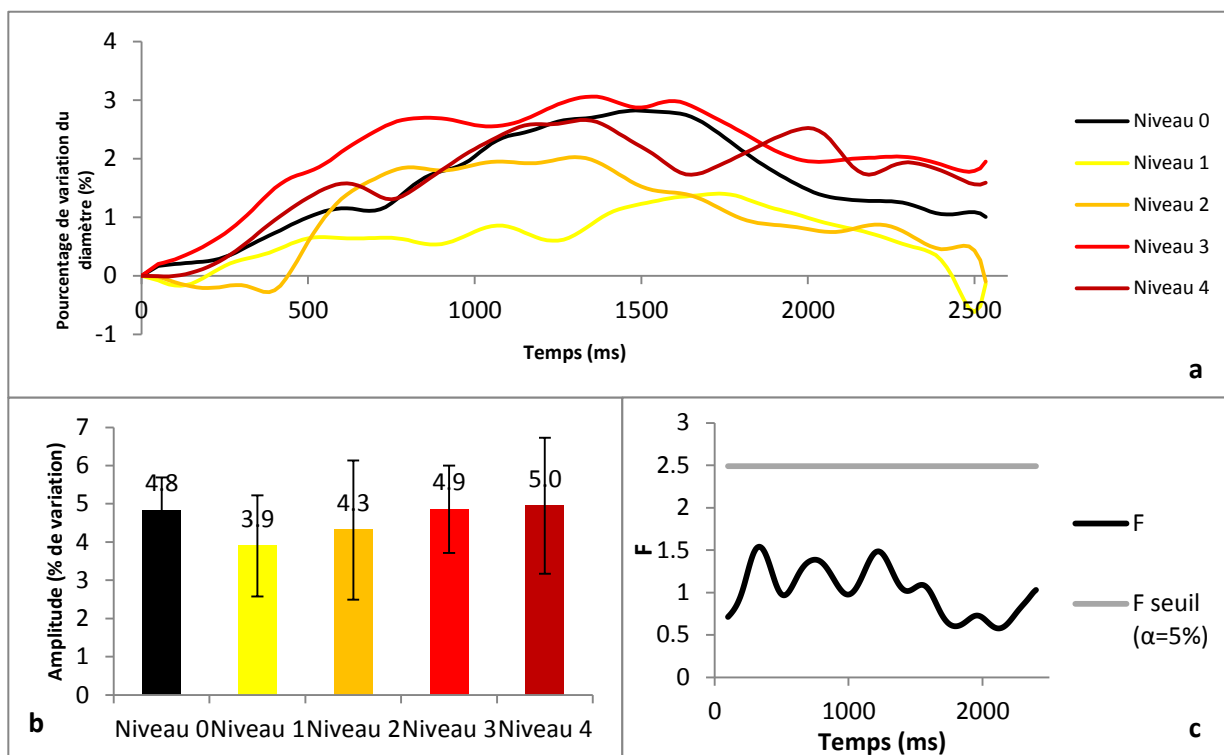


Figure 44. Résultats de la comparaison des 5 niveaux de la gamme Alcool des solutions hydro-alcooliques

(Concentrations en alcool : N0 : 0% V/V, N1 : 10% V/V, N2 : 20% V/V, N3 : 30% V/V, N4 : 40% V/V)

(a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base*

(b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*

(c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur niveau en fonction du temps*

Enfin, la Figure 44 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 20 sujets retenus lors de la comparaison des différents niveaux de la gamme Alcool.

On observe sur le tracé de l'**évolution du pourcentage de variation** une dilatation pupillaire qui serait proportionnelle à la concentration, seule une inversion est observable entre les niveaux 3 et 4. On observe cependant que le niveau 0 fait autant dilater que ces deux niveaux mais cela pourrait une nouvelle fois correspondre à un effet de surprise, la gamme alcool suivait la gamme CO₂ (Figure 44 (a)). L'étude des **pics de dilatation** ne met cependant en évidence aucun effet niveau [$F(4,76)=0.50$, $p=0.734$] (Figure 44 (b)). Pour la **comparaison temps par temps** c'est la même chose, aucune différence n'est mise en évidence (Figure 44 (c)).

➔ **Les différentes solutions de la gamme Alcool entraînent une dilatation pupillaire équivalente. La plage de variation couvrant la majorité des produits alcoolisés, on peut conclure sur la possibilité de comparer des produits à différents niveau d'alcool.**

3.2.5. Comparaison des 4 gammes entre elles

Les pics de dilatation de chaque niveau de chaque gamme pour chaque sujet ont été récupérés et soumis à une analyse de la variance à 2 facteurs, gamme et niveau avec interaction gamme * niveau (les niveaux 3 des gammes sucrée et alcool ont été supprimés pour permettre l'analyse). Les résultats ne révèlent pas d'effet gamme [$F(3,321) = 1.91$, $p = 0.128$] et confirment l'absence d'effet niveau [$F(3,321) = 0.59$, $p = 0.620$]. Enfin, l'interaction gamme * niveau n'est pas significative [$F(9,321) = 1.29$, $p = 0.242$]. La Figure 45 rapporte les pics de dilatations moyens observés par gamme.

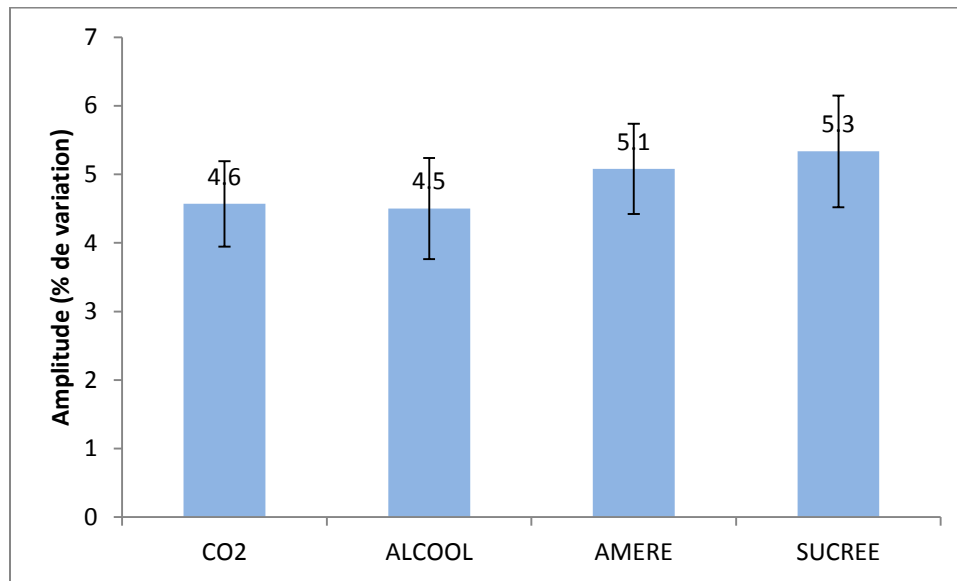


Figure 45. Pics de dilatation moyens de chaque gamme de solutions hydroalcooliques

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

4. Conclusion

Le Tableau 31 récapitule l'ensemble des résultats de comparaison de niveaux par gamme.

En **solution aqueuse**, les concentrations en saveurs amère, acide et salée ont un impact sur la dilatation de la pupille. Plus la concentration est importante plus la réaction est forte. Toutefois, nous avons observé qu'une réaction à une concentration élevée pouvait être atténuée lorsqu'elle était présentée après une concentration déjà élevée, entraînant elle-même une forte dilatation. Lors de la comparaison de produits complexes variant en amertume, salé et/ou acidité, les interprétations devront être faites en ayant à l'esprit que des différences peuvent être dues à ces variations ou masquées par ces variations. Cependant notons tout de même que certaines dilatations peuvent avoir été influencées par un rejet du produit.

En solution **hydro-alcoolique**, l'effet de l'amertume sur le diamètre pupillaire est supprimé par la présence d'alcool et de sucre. Ainsi, dans le cas de produits alcoolisés, les concentrations en saveurs sucrée et amère n'ont pas d'effet sur la dilatation de la pupille. Il en est de même pour les stimuli CO₂ et Alcool.

Enfin, lorsque l'on compare les différentes gammes au sein de chaque ensemble de solutions, on note un effet gamme uniquement pour les solutions aqueuses, les solutions salées entraînent une dilatation plus importante que les autres solutions et les solutions acides une dilatation plus importante que les solutions sucrées.

Pour toute interprétation future, les chiffres récapitulés dans le Tableau 31 qui correspondent aux pics de variation observés pour chacune des solutions pourront servir de référence. Notamment, nous avons observé que la simple ingestion d'eau, entraîne une dilatation pupillaire de 3,8% de variation en moyenne. Il sera intéressant de garder cette donnée en tête pour juger si une dilatation pupillaire consécutive à un produit ne résulte pas simplement d'une stimulation quelconque. Egalement, il peut être intéressant de noter que la saveur salée entraîne une plus forte dilatation que les autres saveurs (à moins qu'il ne s'agisse de l'effet de rejet du produit).

Tableau 31. Tableau récapitulatif des résultats obtenus par gamme

		Pic de variation observé						Effet concentration
		N0	N1	N2	N3	N4	MOY	
Solutions aqueuses	Sucrées	2.9	4	4.2	3.3	5.4	4.2	Non
	Amères	4.2	2.8	4.1	5.2	4.8	4.2	Oui
	Salées	3.4	3.8	4.1	6.2	5.5	4.9	Oui
	Acides	4.3	4.1	6	8.3	6.5	6.2	Oui
	Umami	4.1	4.1	4.4	4.5	4.4	4.3	Non
Solutions hydroalcooliques	Sucrées	4.2	5.2	6.1	5.1	5.8	5.5	Non
	Amères	4.6	5	4.7	5.9		5.2	Non
	Gazeuses (CO2)	5.1	5.2	3.9	4.2		4.4	Non
	Alcool	4.8	3.9	4.3	4.9	5	4.5	Non

CHAPITRE 5 : ÉTUDE DE LA RÉACTION PUPILLAIRE À DES STIMULI GUSTATIFS

1. Expérience 1 – Stimuli gustatifs seuls

1.1. Objectifs

La première étude rapportée dans ce chapitre avait pour objectifs :

- d'évaluer le **pouvoir émotionnel de produit** de différents niveaux d'appréciation par la mesure de la réponse pupillaire consécutive à leur ingestion
- d'étudier la **corrélation entre ce pouvoir émotionnel et l'appréciation hédonique**

Hypothèse : « Il existe une réponse pupillaire consécutive à la dégustation des produits proportionnelle à son pouvoir émotionnel et liée à son niveau d'appréciation par le sujet. »

1.2. Méthodes

1.2.1. Participants

12 sujets au total ont été recrutés parmi le personnel travaillant au Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation (CSGA, Dijon). Aucune sélection n'a été faite sur le genre ou l'âge. Tous les participants avaient une vue normale ou corrigée à la vision normale. Ces douze sujets ont chacun goûté l'ensemble des produits.

1.2.2. Appareil et installation

Le **matériel** utilisé était le suivant :

- Ecran Tobii d'eye tracking T60
- Ordinateur portable avec le logiciel Tobii Studio
- Matériel pour la préparation des produits : balance, contenants pour les pesées
- Contenants pour le test : cuillères, gobelets de 10cL et coupelles en plastique

Les tests ont été réalisés dans une pièce privée de la lumière du jour. La **luminance** de l'écran était de 0,30 cd/m². Il est important de noter que cette expérimentation a été faite en amont de la définition des paramètres optimaux, c'est pourquoi ces valeurs ne respectent pas nécessairement les recommandations faites dans le chapitre 3 notamment au niveau de la luminance de l'écran.

1.2.3. Tâches et stimuli

Trois gammes de produits ont été testées par les sujets :

- Une gamme de 3 sirops de fraise à l'eau
- Une gamme de 3 compotes de pomme
- Une gamme de 2 pâtes à tartiner

Les gammes de sirops de fraise à l'eau et de compotes de pomme ont été reprises du projet EpiPref de la Plateforme sensorielle du CSGA. Le projet EpiPref visait à mieux comprendre les comportements vis-à-vis des aliments gras, salés et sucrés en étudiant notamment, les préférences déclarées ou observées lors de tests sensoriels. Les données de préférences relatives au niveau de sucre dans des compotes de pomme et des sirops de fraise à l'eau ont été récupérées afin de déterminer trois

concentrations en sucre menant à des appréciations différentes pour ces produits. La Figure 46 rapporte les notes hédoniques obtenues pour ces produits lors du projet EpiPref et les concentrations sélectionnées pour notre expérimentation (encadrées en gras). Pour chaque gamme ont été sélectionnés :

- 1 produit « pas apprécié »
- 1 produit « intermédiaire »
- 1 produit « apprécié »

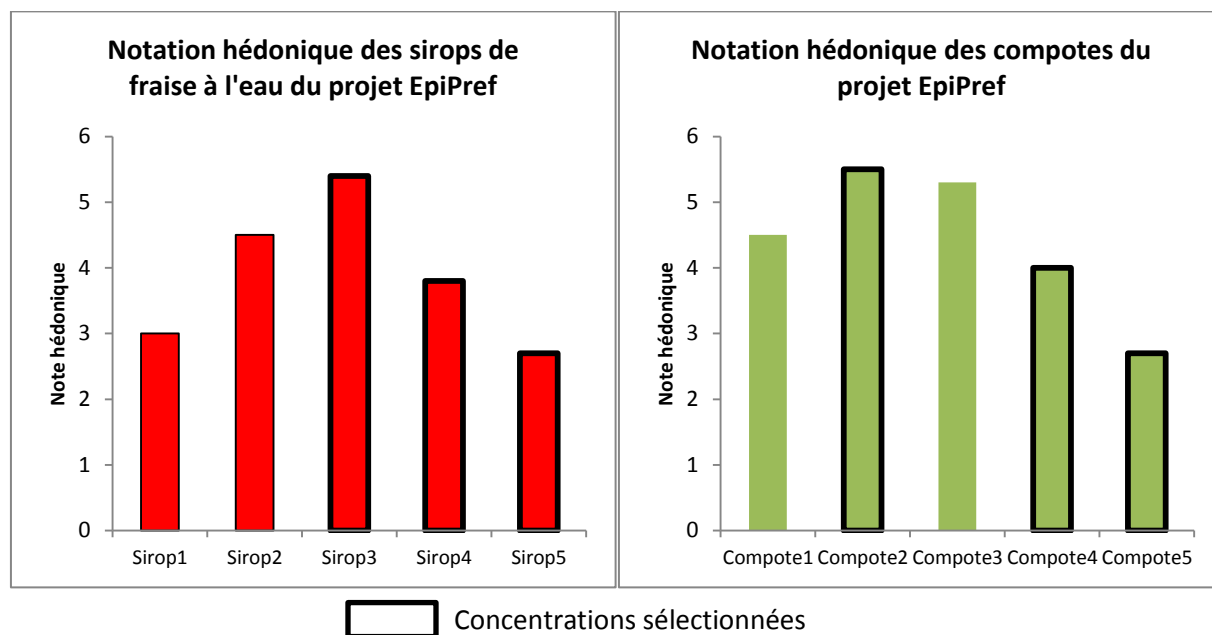


Figure 46. Notation hédonique des gammes de sirops de fraise à l'eau et de compote de pommes du projet EpiPref du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation (CSGA) de Dijon

Les concentrations choisies pour ces deux gammes de produit sont rapportées dans le Tableau 32.

Tableau 32. Concentrations en sucre utilisées pour les gammes de sirops de fraise à l'eau et compotes de pomme

	Aimé		Intermédiaire		Pas aimé	
	Concentration en sucre	Note hédonique	Concentration en sucre	Note hédonique	Concentration en sucre	Note hédonique
Compote	2,50g/100g	5,5	20g/100g	4	40g/100g	2,7
Sirop de fraise à l'eau	2,80g/105mL	5,4	10,15g/105mL	3,8	17,50g/105mL	2,7

Deux marques de pâtes à tartiner ont été choisies : Nutella et Carrefour Discount ; le Nutella étant généralement unanimement préféré à des marques discount.

Une seule tâche de dégustation était réalisée par le sujet. Cette tâche consistait à mettre en bouche le produit, sa durée était de 20s, le sujet consommait la totalité du produit.

1.2.4. Procédure

Tous les produits étaient dégustés au cours d'une même séance. Les sirops de fraise à l'eau étaient présentés dans des gobelets de 10cL contenant 10mL et les compotes et pâtes à tartiner dans une cuillère. En terme de quantité, on servait une cuillerée de compote et une demi cuillerée de Nutella par sujet. Chaque produit devait être consommé dans sa totalité.

Les gammes de produits étaient toujours présentées dans le même ordre, à savoir, sirops de fraise à l'eau, compotes de pomme et enfin pâtes à tartiner. En revanche, les variantes étaient randomisées (cf annexe n°1 pour le plan d'expérience). La Figure 47 rapporte le type de plateau de présentation utilisé pour une séance.

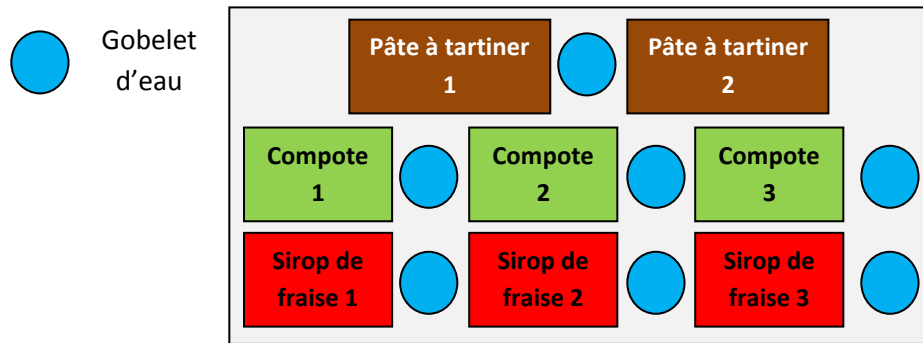


Figure 47. Plateau de présentation des produits pour une séance

Le test se déroulait, comme nous l'avons expliqué précédemment (chapitre 3), en 4 étapes :

1. **Installation du sujet et explication de la séance.**

Le sujet était installé à environ 60 cm de l'écran.

Afin de minimiser la sollicitation des yeux, des consignes identiques pour tous les sujets lui étaient lues :

« Vous allez participer à une séance visant à voir la réaction de vos yeux lorsque vous consommez différents produits. Durant toute la séance je vais vous distribuer différents produits intercalés avec des gobelets d'eau. Vous devrez consommer la totalité de chaque échantillon. Il est impératif que vous fixiez l'écran tout au long de la séance. Avez-vous des questions ? Nous allons maintenant commencer par la calibration de l'appareil.»

2. **Calibration** de l'eye-tracker.

3. **Essais** à blanc.

4. **Mesures.**

Le test démarrait une fois la calibration effectuée, et les consignes comprises par le sujet. Comme il est explicité dans les consignes, le sujet devait, chaque fois qu'un produit lui était proposé, le mettre en bouche en totalité. Entre chaque produit s'intercalait un gobelet d'eau qui comme le sirop de fraise à l'eau, était présenté dans des gobelets de 10cL contenant 10mL.

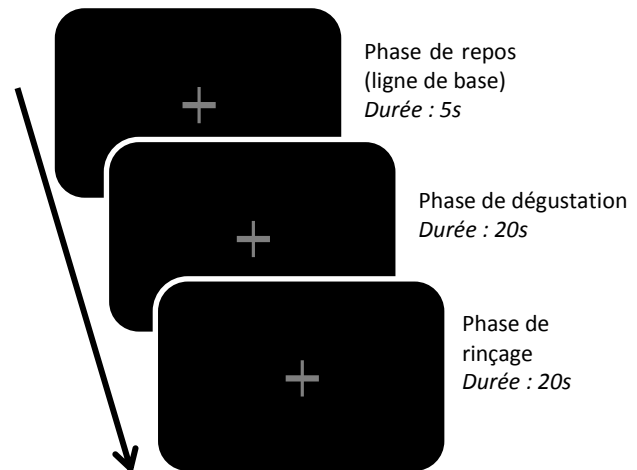


Figure 48. Procédure de l'expérimentation

La procédure de mesure se déroulait en 3 étapes : Une **phase de repos** de **5s** pour la mesure de la ligne de base, **une phase de dégustation** de **20s**, pour l'enregistrement de la réponse pupillaire consécutive à la dégustation des produits et enfin une **phase de rinçage** de **20s** identique à la phase de dégustation mais avec de l'eau à la place du produit (Figure 48). Les écrans présentés étaient des écrans noirs avec une croix grise au centre.

Enfin, à la suite des séances de pupillométrie, l'appréciation hédonique des sujets pour les produits présentés était recueillie afin de pouvoir étudier la corrélation entre préférence et réponse pupillaire. Pour cela, une fois l'ensemble des sujets passé en test de pupillométrie, le groupe de 12 sujets était convoqué pour une seconde séance. Cette seconde séance se déroulait en cabines d'analyse sensorielle. Les produits y étaient servis en monadique (l'un après l'autre) selon le même plan d'expérience que les séances de pupillométrie. Le sujet devait évaluer le produit sur une échelle hédonique allant de 0 à 10. Les données étaient recueillies à l'aide du logiciel Fizz.

1.2.5. Analyse des données

Appréciation des produits

Les notes d'appréciation ont, dans un premier temps, été récupérées pour chaque produit et chaque sujet et soumises à une **analyse de la variance à 2 facteurs**, sujet et produit, menée par type de produit. Elles ont ensuite été moyennées par type de produits (sirop de fraise à l'eau, compote de pomme et pâte à tartiner). Ces moyennes ont été de nouveau soumises à une analyse de la variance à 2 facteurs, sujet et produit. Des tests de **comparaison multiple de Tukey** ont ensuite été appliqués afin de déterminer entre quels produits il existait des différences significatives. Les analyses statistiques ont été conduites en utilisant le logiciel statistique Statistica 10 (© StatSoft).

Réactions pupillaires

Les données ont tout d'abord été extraites comme rapporté dans le chapitre 3 (2.1. Extraction des données) de 1s avant stimulus pour permettre le calcul de la ligne de base à 2,5s après stimulus pour l'étude de la réaction spécifique au stimulus. L'extraction des données a été étendue jusqu'à 6s pour les sirops de fraise à l'eau. En effet, l'éclairage de la salle était un éclairage au plafond, plus précisément, un bloc d'éclairage néon était situé au-dessus de la tête du sujet. Or, les sirops de fraise à l'eau, à boire en totalité, étaient servis, comme on l'a détaillé dans la procédure, dans des gobelets de 10cL contenant 10mL contraignant les sujets à lever la tête afin de mettre le produit en bouche. Ainsi, une contraction pupillaire due à la lumière a été observée (cf explications au chapitre 3 - 1.5. Précautions à prendre et illustration sur figure X). Pour l'exploitation de ces données, nous nous sommes alors inspirés de la méthode de Dietz et al. (2011) développée pour l'étude de la réaction pupillaire face à des images (augmentation de luminance provoquant une contraction pupillaire) qui sera détaillée plus tard. Cette méthode suggère une étude du signal jusqu'à 6s après stimulus.

Ensuite, tous **les enregistrements avec plus de 35% de valeurs manquantes ont été exclus des analyses** (17,7%) (cf Chapitre 4 – 2.5 Analyse de données pour le choix du seuil de 35%).

Puis, les **réactions pupillaires** ont dans un premier temps été **comparées entre variantes, par type de produit**. Ensuite, les différentes variantes des compotes et pâtes à tartiner ont été moyennées et les **réactions pupillaires moyennes de ces deux types de produit ont été comparées entre elles**. La réaction pupillaire moyenne des sirops de fraise à l'eau n'a pas été comparée à celles des compotes et

pâtes à tartiner en raison du profil différent de celle-ci à cause de l'artéfact dû à la lumière. Pour chaque comparaison on a pris garde à ce que les signaux comparés aient été récupérés à partir des mêmes sujets. A savoir, lorsque les données d'un sujet étaient exclues sur un des produits comparés alors ce sujet était exclu de l'analyse ; ceci pour permettre l'élimination d'un maximum de bruit dû aux variations inter-individuelles.

Une **correction de la ligne de base** a été appliquée telle que définie dans le chapitre 3 (3. Traitement de données) pour chacun des produits et les données ont été exprimées en pourcentage de variation. Egalement, les trois premières méthodes rapportées dans ce même chapitre, à savoir, le **tracé des courbes**, la **comparaison des pics de dilatation** et la **comparaison temps par temps** ont été appliquées aux compotes et aux pâtes à tartiner. En revanche pour les sirops de fraise à l'eau, comme nous l'avons précisé précédemment, en raison de l'artéfact dû à la lumière, nous avons adapté nos méthodes en s'inspirant de la méthode de Dietz et al. (2011). Dans leur expérience, ils étudiaient la réponse pupillaire face à des images. Aussi, un pic de contraction a été observé suite à l'affichage de l'image. Ce pic de contraction observé entre 0 et 2s après stimulus (valeur minimale observée) variant entre sujet, la réponse pupillaire pour chaque image avait été calculée comme la variation moyenne à partir du réflexe photomoteur dans une fenêtre de 2,5 à 6 s après le début de l'image. Nous avons alors adapté nos différentes méthodes dans le même esprit. Pour les courbes, nous avons tracé l'évolution du pourcentage de variation en fonction du temps jusqu'à 6s après la mise en bouche afin de pouvoir observer le signal après la contraction due à la lumière. Le pic de dilatation a été redéfini comme la différence entre le maximum de 2,5s à 6s après stimulus et le minimum de 0 à 2s (pic de contraction). Enfin, la comparaison temps par temps a été faite sur les données entre 2,5s et 6s corrigées par le retrait de la valeur du pic de contraction. Enfin, lorsque des différences ont été observées, la **méthode de l'ACP** a été appliquée telle que définie dans le chapitre 3.

Les analyses ont été conduites en utilisant le logiciel Matlab 7.14.0.739 (The Mathworks, Inc., MA, USA).

Corrélation entre les notes hédoniques et les réponses pupillaires

Pour terminer, le lien entre les notes hédoniques et les réponses pupillaires a été étudié afin de déterminer si les réponses pupillaires (émotions) étaient liées à l'appréciation. Pour cela, les pics de dilatation pour chaque produit et chaque sujet ont été récupérés et la corrélation entre ces pics de dilatation et les notes hédoniques a été calculée ; la base de calcul des corrélations était donc le couple produit*sujet. Pour compléter cette observation, lors de réponses pupillaires différentes, les coordonnées de la/des composante(s) principale(s) de l'ACP retenue(s) ont été récupérées et la corrélation entre ces coordonnées et les notes hédoniques a été calculée afin de pouvoir éventuellement approcher d'autres paramètres de la réaction pupillaire que l'amplitude.

Les analyses ont été conduites en utilisant le logiciel Matlab 7.14.0.739 (The Mathworks, Inc., MA, USA).

1.3. Résultats

1.3.1. Appréciation des produits

Les notes d'appréciation ont été récupérées pour chaque produit et chaque sujet. Ces notes ont ensuite été soumises à une ANOVA avec sujet et produit comme facteurs, menée par type de produit. Les résultats ne révèlent un effet variante pour aucun des 3 types de produit [Sirops de fraise : $F(2,22) = 0,86$, $p = 0,437$; Compotes de pomme : $F(2,22) = 0,08$, $p = 0,927$; Pâtes à tartiner : $F(1,11) = 1,36$, p

= 0,269]. La Figure 49 rapporte la note moyenne pour chaque variante de chaque type de produit. Aucune variante ne différait de l'autre/des autres pour chacun des trois types de produit, nous avons alors fait le choix de moyenner les notes d'appréciation des différentes variantes par type de produit pour mieux appréhender les différences entre type de produit.

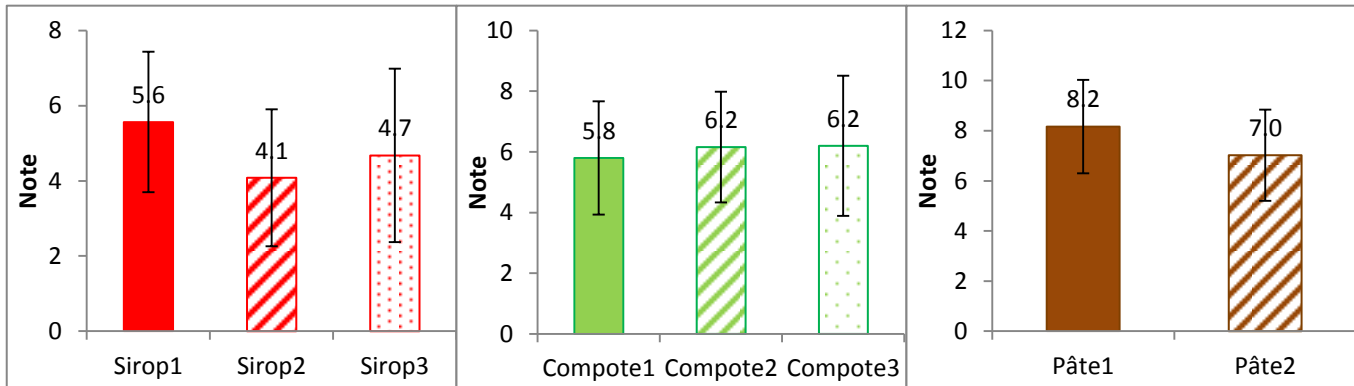


Figure 49. Notation hédonique moyenne des variantes de chaque type de produit
(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

Ainsi, les moyennes des notes d'appréciation pour chaque type de produit ont été calculées et soumises à une ANOVA avec sujet et type de produit comme facteurs. Les résultats révèlent un effet significatif du facteur type de produit [$F(2, 22) = 9,09$, $p = 0,001$, $\eta^2 = 0,29$], avec une note hédonique moyenne plus élevée pour la pâte à tartiner ($M = 7,6$, erreur standard = 0,38) que pour le sirop de fraise à l'eau ($M = 4,8$, erreur standard = 0,63) et la compote ($M = 6,1$, erreur standard = 0,59). La Figure 50 rapporte les notes moyennes par type de produit.

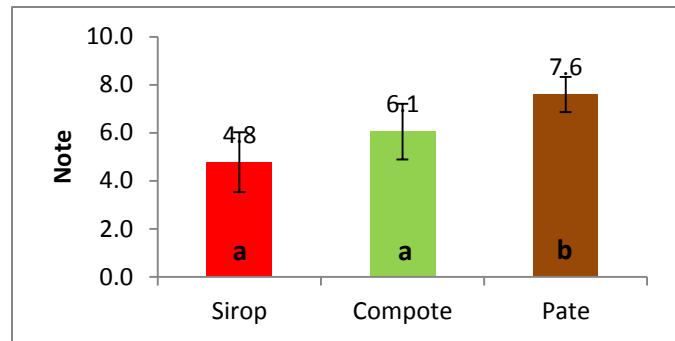


Figure 50. Notation hédonique moyenne par type de produit (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre produits - 2 produits ayant une lettre différente ont une note hédonique différente)

1.3.2. Réactions pupillaires

Dans un premier temps, les réactions pupillaires ont été étudiées par type de produit afin de comparer les différentes variantes entre elles.

Comparaison des 3 sirops

La Figure 51 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 7 sujets retenus lors de la comparaison des différentes variantes de sirop.

La Figure 51 (a) rapporte l'évolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base pour chacune des 3 variantes de sirop de fraise à l'eau dans une fenêtre de 6s après mise en bouche. Le pic de contraction observé entre 0 et 2s dû à la lumière était variable entre sujets [$F(6, 12) = 8,66$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,75$] mais n'était en revanche que peu variable entre les variantes [$F(2,12) = 2,43$, $p = 0,130$]. Suite à ce pic de contraction, la pupille revenait à sa ligne de base puis pour une des variantes, la variante 2, dilatait. Le **pic de dilatation** défini comme la différence entre le maximum de 2,5s à 6s après stimulus et le minimum de 0 à 2s (pic de contraction) a été calculé pour chaque variante et chaque sujet pour être

soumis à une analyse de variance à 2 facteurs, sujet et variante. Les résultats ne révèlent aucun effet variante, le pic de dilatation était équivalent pour les 3 variantes de sirops de fraise à l'eau [$F(2,12) = 1,60$, $p = 0,243$] (Figure 51 (b)). Enfin, la Figure 51 (c) rapporte les résultats de la **comparaison temps par temps** sur moyennes mobiles calculées sur les données de 2,5s à 6s après stimulus, corrigées par le retrait de la valeur du pic de contraction. Aucune différence n'est apparue. Cependant, nous sommes proches de la significativité vers la fin (4,5s et 5,5s), mais nous sommes certainement hors réaction spécifique au produit.

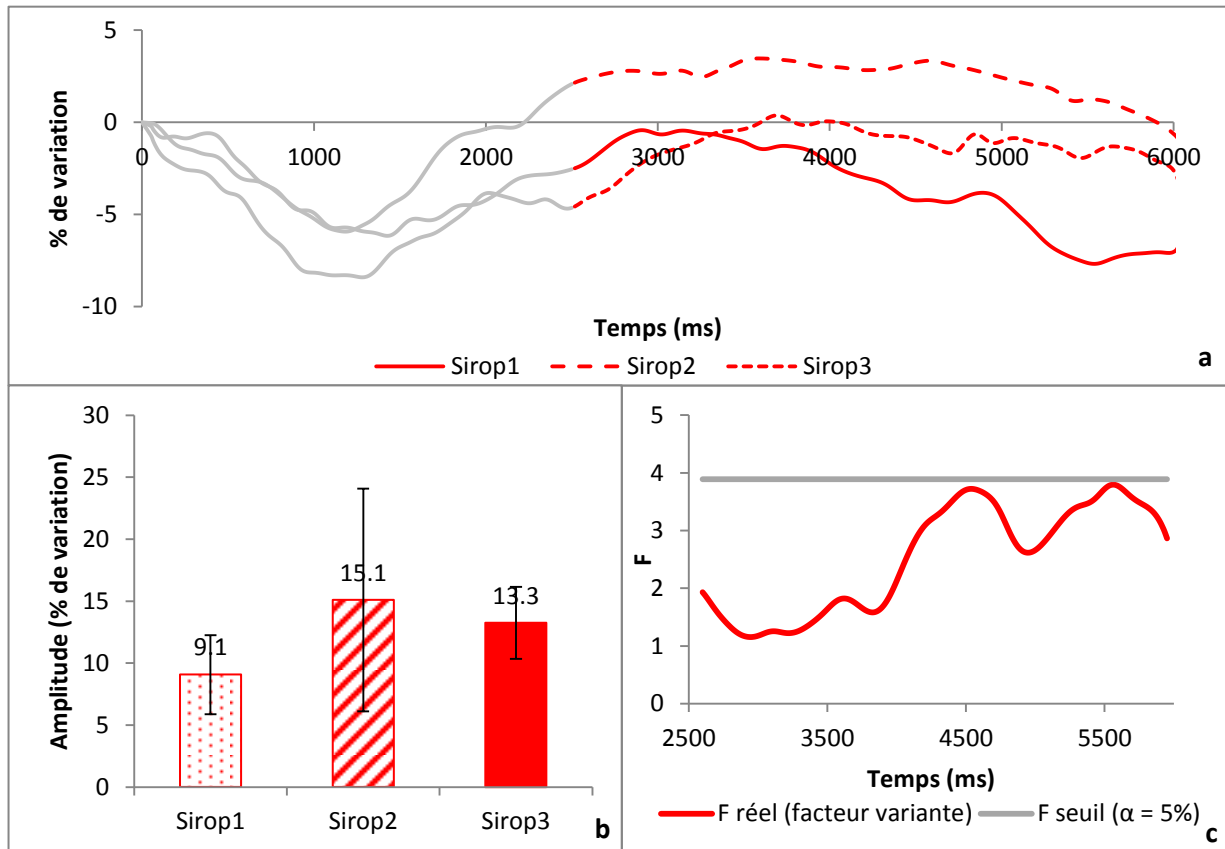


Figure 51. Résultats de la comparaison des 3 variantes de sirop de fraise à l'eau

- (a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base
- (b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)
- (c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur variante en fonction du temps

Comparaison des 3 Compotes

La Figure 52 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 9 sujets retenus lors de la comparaison entre les différentes variantes de compote.

L'évolution du pourcentage de variation consécutive à la mise en bouche des 3 variantes de compote ne semble montrer aucune dilatation pupillaire (Figure 52(a)). Le calcul des **pics de dilatation**, défini comme la valeur maximale entre 0 et 2,5s après mise en bouche du produit montre que nous avons tout de même une légère dilatation pupillaire mais elle est du même ordre de grandeur que pour l'eau (3,8% - cf chapitre 4 – Impact des stimuli chimiosensoriels sur le diamètre pupillaire) et équivalente pour les 3 variantes de compotes [$F(2,19) = 0,47$, $p = 0,634$] (Figure 52(b)). Enfin, lors de la **comparaison temps par temps**, il n'y clairement aucune différence qui ressort entre les 3 variantes (Figure 52(c)).

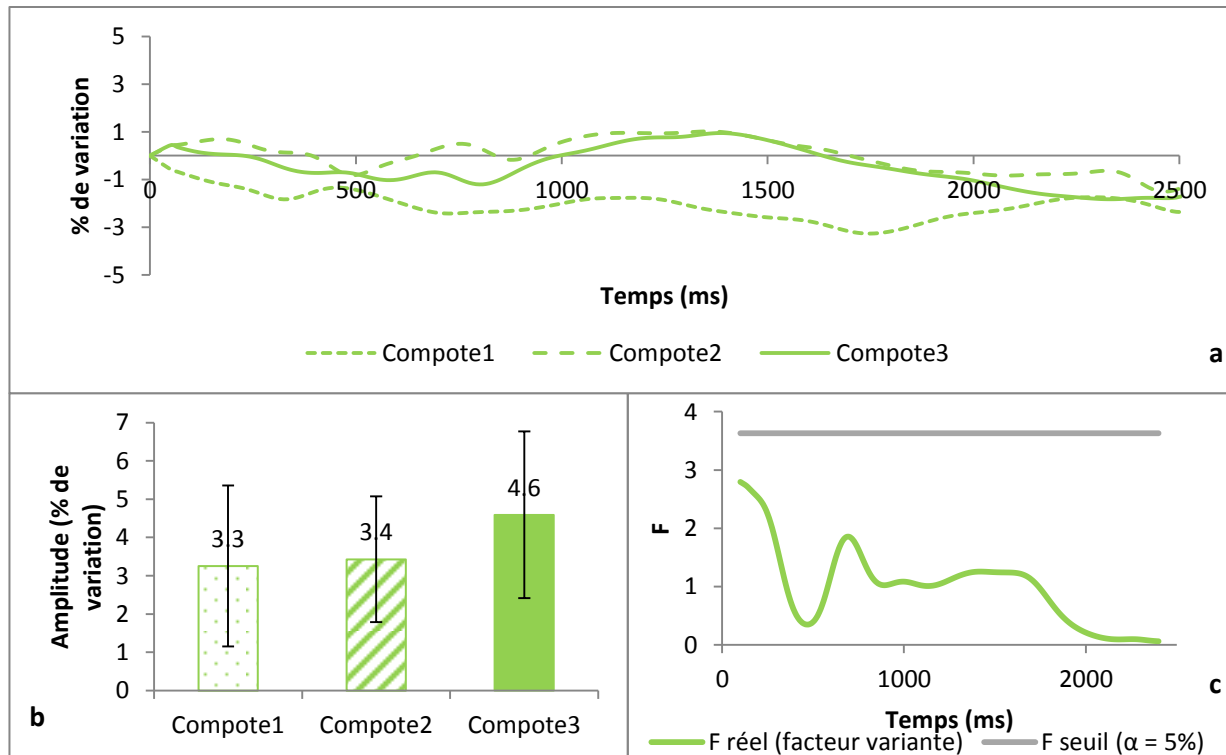


Figure 52. Résultats de la comparaison des 3 variantes de compotes de pomme

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur variante en fonction du temps*

Comparaison des 2 pâtes à tartiner

La Figure 53 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir de 7 sujets retenus lors de la comparaison entre les différentes variantes de pâte à tartiner.

On observe sur le tracé de l'**évolution du pourcentage de variation**, une dilatation pupillaire pour les deux produits, et de manière surprenante, légèrement supérieure pour la pâte à tartiner de marque distributeur (Figure 53(a)). Ceci pourrait être dû à un effet de surprise face à un produit espéré meilleur (Nutella attendu). Cependant, les résultats de l'analyse de la variance des **pics de dilatation** calculés pour chaque produit et chaque sujet ne mettent en évidence aucun effet, le pic de dilatation était équivalent pour les 2 variantes de pâte à tartiner [$F(1,6) = 0,11$, $p = 0,749$] (Figure 53(b)). Enfin, cette observation est confirmée par les résultats de la **comparaison temps par temps** qui n'a mis en évidence aucune différence (Figure 53(c)).

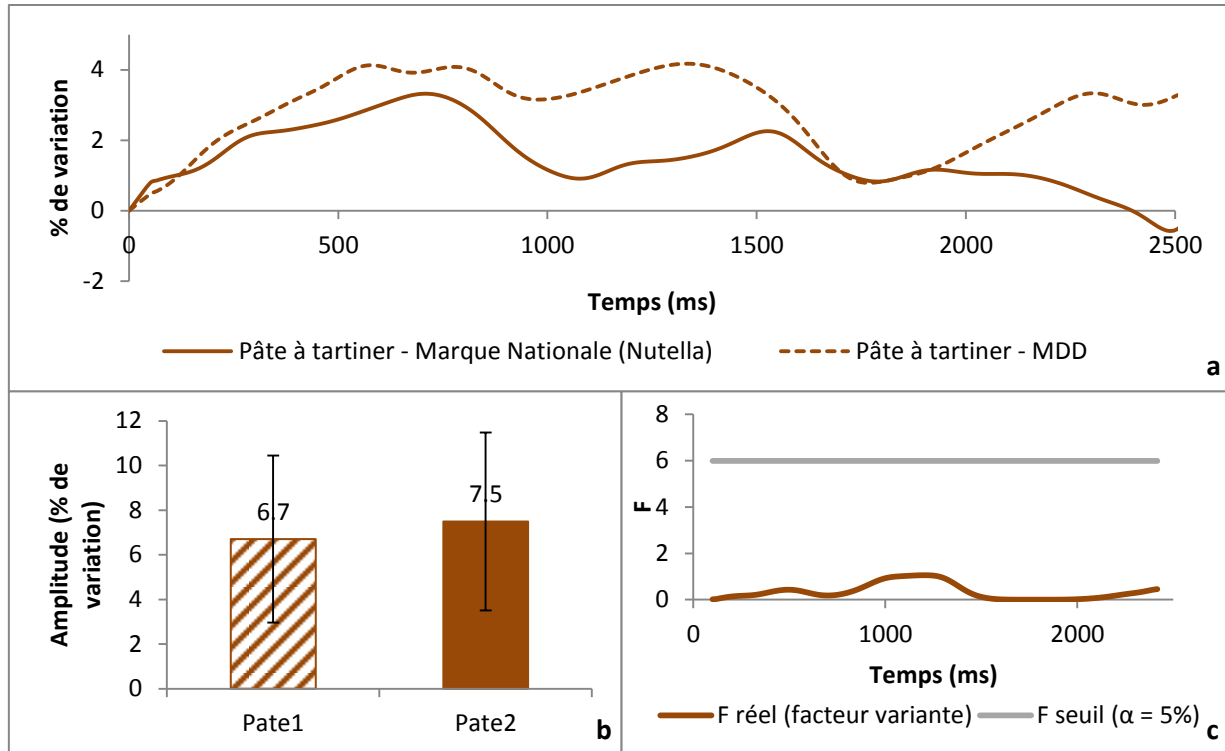


Figure 53. Résultats de la comparaison des 2 variantes de pâte à tartiner

- (a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base
- (b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)
- (c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur variante en fonction du temps

Comparaison des compotes et pâtes à tartiner

La Figure 54 rapporte l'ensemble des résultats obtenus avec les 12 sujets retenus lors de la comparaison entre la réponse pupillaire moyenne des compotes et celle des pâtes à tartiner. L'ensemble des sujets a pu être retenu pour cette comparaison car travaillant sur les moyennes, nous avons conservé les sujets qui avaient au moins un enregistrement conservé pour une des variantes de produit. L'observation en parallèle de l'**évolution moyenne du pourcentage de variation** pour les deux types de produit met en évidence que la dilatation consécutive à la mise en bouche des pâtes à tartiner semble supérieure à celle consécutive à la mise en bouche des compotes de pommes (Figure 54(a)). Cette observation est confirmée par les **pics de dilatation**, le pic de dilatation moyen des pâtes à tartiner était supérieur à celui des compotes [$F(1,10) = 13,34$, $p = 0,004$, $\eta^2 = 0,42$] (Figure 54(b)). Enfin, les résultats de la **comparaison temps par temps** montrent des différences sur la période de 200ms à 800ms (Figure 54(c)). Une **ACP** a été réalisée sur cette période, une seule composante principale a été retenue. Cette composante rapportait 86,14% de la variance totale et était corrélée au diamètre moyen de la pupille ($R = 0,99$, $p < 0,001$). Une analyse de la variance avec sujet et produit comme facteurs a été réalisée sur les coordonnées de cette composante révélant un effet produit [$F(1, 10) = 17,44$, $p = 0,002$, $\eta^2 = 0,19$]. Le signal moyen de 200 à 800ms, soit le signal moyen pendant la phase de dilatation était plus important pour les pâtes à tartiner que pour les compotes.

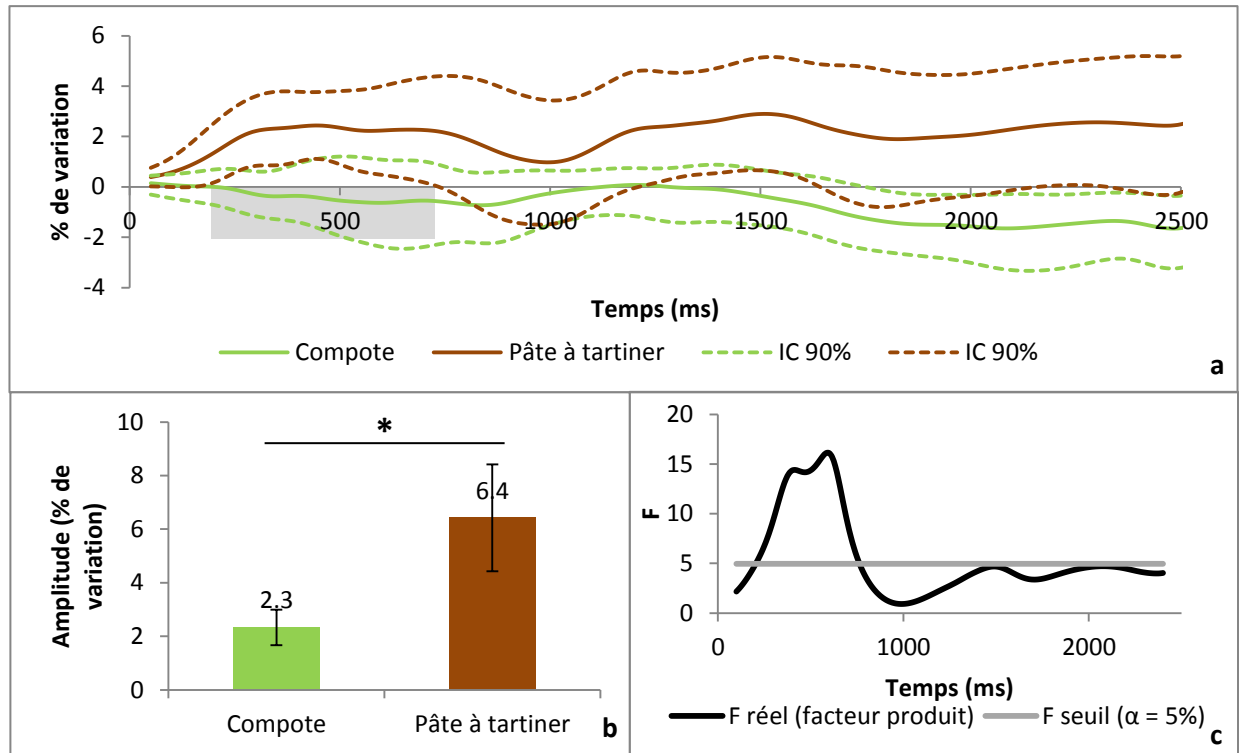


Figure 54. Résultats de la comparaison de la compote à la pâte à tartiner

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; * = différence significative avec $\alpha = 5\%$)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur type de produit*

1.3.3. Corrélation entre les notes hédoniques et les réponses pupillaires

On a pu observer que la réponse pupillaire moyenne des pâtes à tartiner était plus importante que celle des compotes de pomme, ce qui laisse supposer que la pâte à tartiner provoque plus d'émotions que la compote. Egalement, nous avons mis en évidence une appréciation hédonique moyenne plus forte pour les pâtes à tartiner par rapport aux compotes de pommes. On pourrait ainsi penser que l'appréciation du produit est le déterminant de la réponse pupillaire, autrement dit le pouvoir émotionnel du produit dépend, au moins en partie, de l'appréciation. Pour vérifier cette hypothèse, la corrélation entre ces deux mesures a été observée. Pour cela les corrélations entre les pics de dilatation et les notes hédoniques ont été calculées pour l'ensemble des produits, puis pour les compotes et pâtes à tartiner uniquement, le pic de dilatation récupéré pour les sirops de fraise à l'eau n'étant pas sûr en raison de l'artéfact dû à la lumière. Aucune de ces deux corrélations, calculées au niveau individuel, n'était significative (respectivement, $R = -0,10$, $p = 0,389$ et $R = 0,22$, $p = 0,130$). Pour compléter ces résultats, les résultats de l'ACP (coordonnées sur la première composante) appliquée aux signaux moyens des pâtes à tartiner et des compotes de pomme ont été récupérés. La corrélation entre ces coordonnées, représentant le signal moyen de 200 à 800ms, et les notes hédoniques moyennes de ces deux produits a été calculée. Cette corrélation n'était pas significative ($R = -0,05$, $p = 0,819$). Ainsi, ni

l'amplitude des pics de dilatation, ni le signal moyen de 200 à 800ms ne peuvent être reliés à l'appréciation des produits ; les émotions ne seraient pas liées à l'appréciation hédonique.

1.4. Conclusion

D'une part, l'analyse des données d'appréciation des produits n'a révélé aucune différence d'appréciation entre les différentes variantes de chaque produit. Cependant, nous sommes sur un effectif très faible, on peut fortement supposer qu'un effectif plus grand aurait conduit à des différences. En revanche, elle a mis en évidence une différence entre l'appréciation moyenne des pâtes à tartiner et les appréciations moyennes des compotes de pommes et sirops de fraise à l'eau, les sujets préfèrent la pâte à tartiner.

D'autre part, cette première expérimentation a permis de montrer qu'il existe une réponse pupillaire consécutive à l'ingestion de produits suggérant la présence d'émotions. Cette réponse pupillaire est équivalente entre les différentes variantes d'un même type de produit. En revanche, elle diffère entre types de produit, la dilatation pupillaire est plus importante pour la pâte à tartiner ($M = 6,4\%$, erreur standard : 1,01) que pour la compote de pomme ($M = 2,3\%$, erreur standard : 0,34) (les comparaisons n'ont pas été faites avec les sirops de fraise à l'eau en raison de l'artéfact dû à la lumière) ; **il semblerait que les variantes d'un même type de produit aient un pouvoir émotionnel équivalent mais que certains types de produits aient un pouvoir émotionnel plus fort que d'autres (pâte à tartiner versus compotes)** la pâte à tartiner aurait un pouvoir émotionnel plus fort que les compotes.

Notre hypothèse était : « Il existe une réponse pupillaire consécutive à la dégustation des produits proportionnelle à son pouvoir émotionnel et lié à son niveau de préférence ». En effet, cela semblerait être le cas à première vue, le produit qui ressort comme le plus émotionnel (réponse pupillaire plus importante), est aussi le produit préféré. Cependant, l'étude de la corrélation entre réponse pupillaire et notation hédonique n'a pas confirmé le lien entre émotions et préférences. **Il semblerait donc que les différences en termes de réponses pupillaires, autrement dit les émotions, ne soient pas uniquement liées à l'appréciation hédonique.**

De plus, lorsque l'on met ces résultats en parallèle des résultats de recherche des effets des stimuli chimiosensoriels obtenus à partir des solutions aqueuses (cf chapitre 4 – Tableau 31), on constate que pour la compote, la réponse pupillaire est en dessous du pourcentage de variation de l'ensemble des solutions, y compris l'eau. Nous avons probablement une dilatation simplement due à la stimulation. En revanche, pour la pâte à tartiner, on observe une dilatation pupillaire supérieure à l'ensemble des solutions testées. Il est donc envisageable que la dilatation observée ne soit pas uniquement le résultat d'une stimulation. **On renforce ici l'idée d'un pouvoir émotionnel marqué pour certains types de produits (comme la pâte à tartiner).**

2. Expérience 2 – Stimuli gustatifs en contexte (Congruent vs non congruent)

2.1. Objectifs

Cette étude avait pour objectifs :

- d'évaluer le **pouvoir émotionnel de différentes boissons alcoolisées** par la mesure de la réponse pupillaire consécutive à leur mise en bouche

- d'évaluer le **pouvoir émotionnel de différentes ambiances**, soit congruentes avec la consommation des boissons alcoolisées testées, soit non congruentes avec la consommation de boissons alcoolisées par la mesure de la réponse pupillaire durant leur écoute
- d'étudier l'**impact d'une amorce contextuelle (les ambiances)** congruente ou non congruente **sur le pouvoir émotionnel** des produits par la comparaison des réponses pupillaires consécutives à leur mise en bouche dans les différentes conditions
- d'étudier l'**impact d'une amorce produit sur le pouvoir émotionnel des ambiances** congruentes par la comparaison des réponses pupillaires durant leur écoute dans les différentes conditions

Nos hypothèses étaient les suivantes :

Hypothèse n°1 : « Il existe une réponse pupillaire consécutive à la mise en bouche de boissons alcoolisées traduisant la présence d'émotions et pouvant être impactée par un amorçage contextuel. »

Hypothèse n°2 : « Il existe une réponse pupillaire durant l'écoute d'ambiances traduisant la présence d'émotions et pouvant être impactée par un amorçage produit ».

2.2. Méthodes

2.2.1. Participants

30 sujets au total ont été recrutés parmi le personnel travaillant au Centre de Recherche Pernod Ricard. Nous avons choisi d'augmenter notre effectif par rapport à l'expérimentation précédente afin de garantir de meilleurs effectifs pour chacune des comparaisons même en cas de perte de données. Comme pour la première expérimentation, aucune sélection n'a été faite sur le genre ou l'âge. Tous les participants avaient une vue normale ou corrigée à la vision normale.

2.2.2. Appareil et installation

Le **matériel** utilisé était le suivant :

- Ecran Tobii d'eye tracking T60
- Ordinateur portable avec le logiciel Tobii Studio
- Matériel pour la préparation des produits

Les tests ont été réalisés dans une pièce privée de la lumière du jour. La **luminance** de l'écran était de 0,30 cd/m². Une nouvelle fois cette expérimentation a été faite en amont de la définition des paramètres optimaux, c'est pourquoi ces valeurs ne respectent pas nécessairement les recommandations faites.

2.2.3. Tâches et stimuli

Deux principales tâches étaient réalisées par chaque sujet, une **tâche de dégustation** et une **tâche d'écoute**. La tâche de dégustation consistait à mettre en bouche 10mL de produit pendant 10s puis de le recracher. La tâche d'écoute consistait à écouter une ambiance, sa durée était de 1 minute, le sujet avait simplement comme consigne d'écouter. Ces deux tâches se déroulaient l'une après l'autre, soit la tâche de dégustation était suivie de la tâche d'écoute, on avait alors un amorçage produit, soit la tâche de dégustation était précédée de la tâche d'écoute, on avait alors un amorçage contextuel.

Les **produits** testés étaient des boissons alcoolisées :



Mojito :

Le Mojito était préparé de manière standardisée selon la formulation suivante :

- Arôme de menthe (Dohler 5.80769) 0,32mL
- Citron (jus concentré ; 7.19508) 22,9g
- Rhum (Havana Club 3 ans) 281 mL
- Sucrose 68,8g
- Eau QS 1000mL



Whisky :

Le whisky était consommé pur, il n'y avait donc aucune préparation spécifique. Nous avons travaillé avec un whisky de marque Ballantine's, le Ballantine's Finest.



Pastis :

Pour le pastis, nous avons travaillé avec le produit Ricard. Il était dilué à l'eau selon les doses suivantes :

- 1 volume de Ricard
- 5 volumes d'eau (Evian)



Bière :

La bière était consommée telle quelle. Il s'agissait de bière blonde de marque LEFFE.

Les **ambiances** sonores testées étaient soit congruentes avec une des boissons testées, soit non congruentes avec la consommation de boissons alcoolisées. Ces ambiances ont été construites pour les ambiances congruentes, à partir des résultats d'un test d'évocation. 9 sujets ont rempli un questionnaire ouvert avec pour consigne :

« Pour chacune des boissons qui vont vous être proposées, merci d'indiquer ce qu'elle vous évoque. Dans quel contexte/endroit imagineriez-vous bien sa consommation ? Les réponses peuvent être personnelles (choses vécues) ou bien plus générales (vous, les autres, les idées préconçues, etc.) »

L'ensemble des réponses recueillies sont rapportées en annexe n°2. Le Tableau 33 reprend les citations que nous avons utilisées pour la construction de nos ambiances.

Tableau 33. Réponses au questionnaire d'évocation, utilisées pour la construction des ambiances

	"Citation" (nombre de citations)
Mojito	"Bar" (5) "Ambiance/bar latino" (3) "Amérique du sud / Amérique latine" (3) "Cuba" (3) "Restaurant mexicain" (1) "Faire de la glace pilée" (1)
Pastis	"Sud de la France" (6) "Marseille" (5) "Pétanque" (3) "Cigales" (1)
Bière	"Bar" (3) "Bar à bière" (2) "Pub irlandais" (2) "Musique irlandaise" (1) "Irlande" (1)
Whisky	"Boisson d'hommes/masculin" (2) "Bar très chic lors d'une rencontre d'affaires" (1) "Dîners très classe" (1) "Caractère, prestige" (1)

Les ambiances non congruentes ont quant à elles été choisies de manière à correspondre à des ambiances dans lesquelles l'alcool n'est pas normalement consommé. Ces ambiances étaient ainsi au nombre de huit. Le Tableau 34 rapporte la description de chacune de ces 8 ambiances, ainsi que les associations produit/ambiance choisies.

Tableau 34. Description des ambiances et association ambiance/produit

Ambiance	Description	Association	
		Type	produit
Latino	Ambiance bar latino : musique latino, bruits de préparation de cocktails (shaker, glaçons), personnes qui discutent	Congruente	Mojito
Irlandaise	Ambiance pub irlandais : musique irlandaise, personnes qui discutent		Bière
Provençale	Bruits de cigale, personnes qui jouent à la pétanque et qui trinquent		Pastis
Lounge	Musique au piano, personnes qui discutent « affaires »		Lounge
Douche	Bruits de l'eau de la douche qui coule, bruits de radio, personne qui siffle (« I'm singing in the rain »)	Non congruente	Bière
Bureau	Bruits de clavier, de téléphone et de fax, personnes qui parlent « travail »		Pastis
Voiture	Bruits de moteur, de circulation, de klaxons et de radio		Whisky
Usine	Bruits de machines d'embouteillage		Mojito

2.2.4. Procédure

Chaque séance correspondait à une condition d'amorce : amorce contextuelle ou amorce produit. La présentation des différentes associations produit/ambiance était équilibrée entre les sujets (cf annexe n°1 pour le plan d'expérience).

La procédure de mesure se déroulait en 5 étapes :

- Séance amorce contextuelle :
Une **phase de repos** de **5s** pour la mesure de la ligne de base, une **phase d'écoute** de **1minute** pour l'enregistrement de la réponse pupillaire durant l'écoute des ambiances, une nouvelle **phase de repos** de **5s** toujours pour la mesure de la ligne de base, **une phase de dégustation** de **10s** pour l'enregistrement de la réponse pupillaire consécutive à la dégustation des produits et enfin une **phase de rinçage** de **40s** permettant également le repos des yeux (Figure 55(a))
- Séance amorce produit :
Les 5 étapes étaient les mêmes avec juste une inversion entre la phase de dégustation et la phase d'écoute (Figure 55(b))

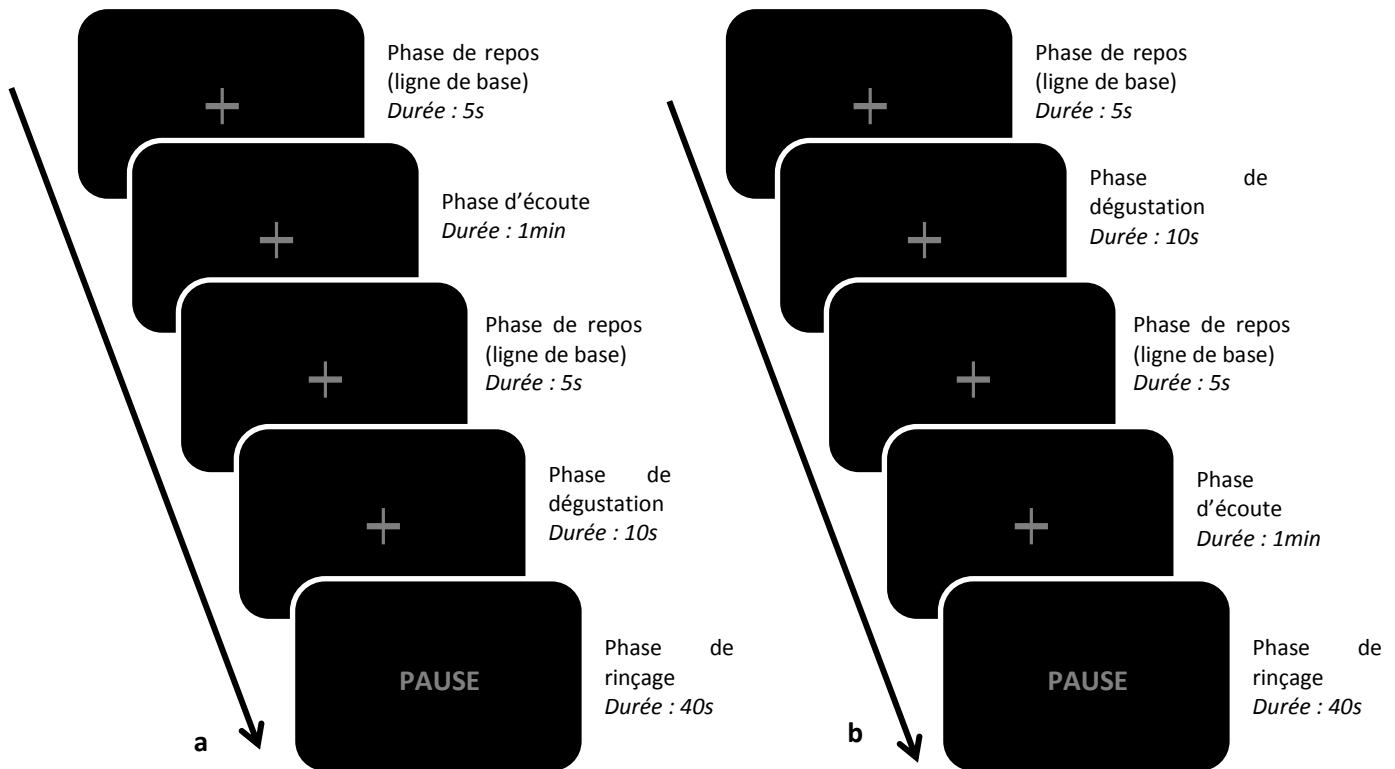


Figure 55. Procédure de l'expérimentation

- (a) Séance avec amorce contextuelle
- (b) Séances avec amorce produit

Le test se déroulait en 4 étapes :

1. **Installation du sujet et explication de la séance.**

Le sujet était installé à environ 60 cm de l'écran. Afin de minimiser la sollicitation des yeux, des consignes identiques pour tous les sujets lui étaient lues :

Amorçage produit : « Vous allez participer à une séance visant à voir la réaction de vos yeux lorsque vous dégustez différents produits et écoutez différents sons. La séance va se répéter dans l'ordre suivant, phase de repos, phase de dégustation, phase de repos, phase d'écoute et phase de rinçage. Avant et pendant chaque phase d'écoute et de dégustation il sera important de garder les yeux sur l'écran. La phase de dégustation consistera à mettre en bouche un produit, la totalité de chaque gobelet devant être bu en une seule gorgée. La phase d'écoute consistera simplement à écouter une ambiance qui sera diffusée dans ce casque. Enfin la phase de rinçage consistera à vous rincer la bouche à l'aide de crackers ou de quartiers de pomme et de l'eau. Seulement durant cette phase de rinçage, vous aurez la liberté de ne pas fixer l'écran. La phase de rinçage vous sera indiquée à l'écran et durera environ 40s, je vous indiquerai le moment du retour en phase de dégustation.

Avez-vous des questions ?

Nous allons maintenant commencer par la calibration de l'appareil puis nous réaliserons un essai avec de l'eau et nous passerons au test.»

Amorçage contextuel : « Vous allez participer à une séance visant à voir la réaction de vos yeux lorsque vous buvez différents produits et écoutez différents sons. La séance va se répéter dans l'ordre suivant, phase de repos, phase d'écoute, phase de repos, phase de dégustation et phase de rinçage. Avant et pendant chaque phase de dégustation et d'écoute il sera important de garder les yeux sur l'écran. La phase d'écoute consistera simplement à écouter une ambiance qui sera diffusée dans ce casque. La phase de dégustation consistera à mettre en bouche un produit, la totalité de chaque gobelet devant être bu en une seule gorgée. Enfin la phase de rinçage consistera à vous rincer la bouche à l'aide de crackers ou de quartiers de pomme et de l'eau. Seulement durant cette phase de rinçage, vous aurez la liberté de ne pas fixer l'écran. La phase de rinçage vous sera indiquée à l'écran et durera environ 40s, je vous indiquerai le moment du retour en phase d'écoute.

Avez-vous des questions ?

Nous allons maintenant commencer par la calibration de l'appareil puis nous réaliserons un essai avec de l'eau et nous passerons au test.»

2. **Calibration** de l'eye-tracker.

3. **Essais** à blanc.

4. **Mesures**

Le test démarrait une fois la calibration effectuée, et les consignes comprises par le sujet. Comme il est explicité dans les consignes le sujet devait, chaque fois qu'un produit lui était donné, le mettre en bouche en totalité.

A la fin de la 2^{ème} séance, chaque sujet était invité à remplir un questionnaire final afin de renseigner son appréciation des boissons testées (en général, pas spécifiquement ceux de l'étude), son appréciation des ambiances et la pertinence des associations odeur – ambiance (annexe n°3).

2.2.5. Analyse des données

Pertinence des associations

Dans un premier temps, avant de commencer l'exploitation des données, nous avons cherché à savoir si les associations que nous avons réalisées entre les produits et les ambiances étaient pertinentes. Lors du questionnaire final, les participants devaient noter sur une échelle de 0 à 4 la

pertinence des associations entre les odeurs et chacune des ambiances congruentes et non congruentes. Les moyennes de chaque association ont été observées.

Appréciation des produits et des ambiances

Les notes d'appréciation ont, dans un premier temps, été récupérées pour chaque produit et chaque sujet et soumises à une **analyse de la variance à 2 facteurs**, sujet et produit. De la même manière, les notes d'appréciation ont été récupérées pour chaque ambiance et chaque sujet et soumises à une **analyse de la variance à 2 facteurs**, sujet et ambiance. Des tests de **comparaison multiple de Tukey** ont ensuite été appliqués afin de déterminer les produits et/ou les ambiances entre lesquels il existait des différences significatives. Les analyses statistiques ont été conduites en utilisant le logiciel statistique Statistica 10 (© StatSoft).

Réactions pupillaires

La mise en bouche des produits s'est déroulée dans des conditions similaires à l'expérimentation rapportée dans la première partie de ce chapitre, les produits étaient servis dans des gobelets de 10cL contenant 10mL devant être bu en totalité et la lumière était une lumière au plafond. Aussi, une contraction pupillaire due à la lumière au début de réaction a retardé la dilatation pupillaire consécutive à la mise en bouche des produits. Ainsi, **pour les produits**, pour les mêmes raisons que précédemment, à savoir afin de pouvoir appliquer la méthode de Dietz et al. (2011) **l'extraction des données a été faite de 1s avant la mise en bouche du produit à 6s après. Pour les ambiances**, comme décrit dans la méthode rapportée dans le chapitre 3, les données ont dans un premier temps été extraites de 1s avant le début de l'écoute à 2,5s après. Cependant, après inspection visuelle il est apparu évident qu'à 2,5s, la réaction n'était pas terminée. **L'extraction a été petit à petit étendue**, nous avons finalement décidé d'étendre **jusqu'à 10 s** après le début de l'écoute ce qui nous permet d'être sûrs d'avoir atteint la fin de la réaction.

Une nouvelle fois, tous **les enregistrements avec plus de 35% de valeurs manquantes ont été exclus des analyses** (34,0%) (cf Chapitre 4 – 2.5 Analyse de données pour le choix du seuil). Nous observons ici une perte plus importante d'enregistrements que lors de l'expérimentation rapportée en première partie (17,7%) car 50% de nos enregistrements correspondaient à des enregistrements de réponse pupillaire aux produits dont le mode de consommation a entraîné une forte perte de données. Lors de l'expérimentation précédente, « seulement » 1 produit sur 3 était concerné (sirop de fraise à l'eau) soit 33% des enregistrements.

Ensuite, les **réactions pupillaires** ont dans un premier temps été **comparées entre les produits, sans amorce**. Puis, pour chaque produit les réactions pupillaires ont été **comparées entre les différentes conditions (sans amorce, avec amorce congruente et avec amorce non congruente)**. La même chose a été effectuée pour les ambiances avec tout d'abord, une **comparaison entre les ambiances sans amorce**. Puis pour chaque ambiance congruente (irlandaise, latino, lounge et provençale), les réactions pupillaires ont été **comparées avec ou sans amorce** (produit). Pour chaque comparaison on a pris garde à ce que les signaux comparés soient récupérés à partir des mêmes sujets. A savoir, lorsque les données d'un sujet étaient exclues sur un des produits ou une des ambiances comparé(e)s, alors ce sujet était exclu de l'analyse. Ceci permettait d'éliminer un maximum de bruit dû aux variations inter-individuelles.

Une **correction de la ligne de base** a été appliquée telle que définie dans le chapitre 3 (3. Traitement de données) pour chacun des produits et chacune des ambiances, les données ont été exprimées en pourcentage de variation. Egalement, les trois premières méthodes rapportées dans ce même chapitre, à savoir, le **tracé des courbes**, la **comparaison des pics de dilatation** et la **comparaison**

temps par temps ont été appliquées aux ambiances avec une extension de la fenêtre jusqu'à 10s après le début de l'écoute. En revanche pour les boissons alcoolisées, toujours en raison de l'artéfact dû à la lumière, nous avons adapté nos méthodes en s'inspirant de la méthode de Dietz et al. (2011). Comme expliqué dans la première partie de ce chapitre, dans leur expérience, ils étudiaient la réponse pupillaire face à des images. Aussi, un pic de contraction a été observé suite à l'affichage de l'image. Ce pic de contraction observé entre 0 et 2s après stimulus (valeur minimale observée) variant entre sujet, la réponse pupillaire pour chaque image avait été calculée comme la variation moyenne à partir du réflexe photomoteur dans une fenêtre de 2,5 s à 6 s après le début de l'image. Nous avons alors adapté nos différentes méthodes dans le même esprit. Pour les courbes, nous avons tracé l'évolution du pourcentage de variation en fonction du temps jusqu'à 6s après la mise en bouche afin de pouvoir observer le signal après la contraction due à la lumière. Le pic de dilatation a été redéfini comme la différence entre le maximum de 2,5 s à 6 s après stimulus et le minimum de 0 à 2 s (pic de contraction). Enfin, la comparaison temps par temps a été faite sur les données entre 2,5 s et 6 s corrigées par le retrait de la valeur du pic de contraction. Enfin, lorsque des différences ont été observées, la **méthode de l'ACP** a été appliquée telle que définie dans le chapitre 3. Notons que lors de la comparaison des conditions d'amorce, que cela soit pour les ambiances ou pour les produits, les ANOVA ont été réalisées sur l'ensemble des produits ou ambiances, ainsi nous avons 3 facteurs : sujet, produit/ambiance et condition d'amorce et une interaction produit/ambiance * condition d'amorce.

Corrélation entre les réponses pupillaires et les données déclaratives (questionnaires hédonique et émotionnel)

Pour terminer, le lien entre les notes hédoniques et les réponses pupillaires a été étudié afin de déterminer une nouvelle fois si les réponses pupillaires (émotions) étaient liées à l'appréciation. Pour cela, les pics de dilatation pour chaque produit et chaque sujet ont été récupérés et la corrélation entre ces pics de dilatation et les notes hédoniques a été calculée ; la base de calcul des corrélations était donc le couple produit*sujet. La même chose a ensuite été effectuée pour les ambiances avec comme base de calcul le couple ambiance*sujet. Pour compléter cette observation, lors de réponses pupillaires différentes, les coordonnées de la/des composante(s) principale(s) de l'ACP retenue(s) ont été récupérées et la corrélation entre ces coordonnées et les notes hédoniques a été calculée afin de pouvoir éventuellement approcher d'autres paramètres de la réaction pupillaire que l'amplitude. La même analyse a été réalisée avec la fréquence de consommation. Ces corrélations ont été calculées selon la même base de calcul, à savoir produit*sujet ou ambiance*sujet.

Les analyses ont été conduites en utilisant le logiciel Matlab 7.14.0.739 (The Mathworks, Inc., MA, USA).

2.3. Résultats

2.3.1. Evaluation de la pertinence des associations

Le Tableau 35 rapporte les notes de congruence moyennes entre chaque produit et chaque ambiance.

Tableau 35. Moyennes des notes de congruence Produit – Ambiance

	Latino	Provençale	Irlandaise	Lounge	Usine	Bureau	Douche	Voiture
Mojito	4,0	0,9	0,5	2,3	0,1	0,3	0,2	0,0
Pastis	0,5	4,0	0,2	0,5	0,5	0,4	0,6	0,1
Bière	1,3	1,7	3,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,4
Whisky	0,7	0,7	3,3	3,2	0,2	0,7	0,4	0,0

Légende - en vert : note de pertinence la plus haute / en rouge : note de pertinence la plus basse / fond gris : associations choisies

Les moyennes les plus élevées pour les produits mojito, pastis et bière sont celles avec leur ambiance congruente respective. En revanche, pour le produit whisky, on a une bonne concordance avec l'ambiance lounge choisie mais celle avec l'ambiance irlandaise est légèrement supérieure. A l'inverse, les notes les plus basses sont avec l'ambiance transport et ceci pour les 4 produits. Cependant, les associations choisies mènent toutes à des faibles scores de congruence (Mojito/Usine : 0,1 ; Pastis/Bureau : 0,4 ; Bière/Douche : 0,8 et Whisky/Voiture : 0,0).

2.3.2. Appréciation des produits et des ambiances

Les notes d'appréciation ont été récupérées pour chaque produit et 28 des 30 sujets (les données étant manquantes pour 2 sujets) et soumises à une **analyse de la variance à 2 facteurs**, sujet et produit. Les résultats révèlent un effet produit [$F(3, 81)=6,44$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,14$] ; selon les résultats des tests de comparaison multiple, le mojito était préféré aux 3 autres produits (Figure 56). La même analyse sur les fréquences de consommation a montré un léger effet produit [$F(3,81)=2,66$, $p = 0,053$, $\eta^2 = 0,05$] ; selon les résultats des tests de comparaison multiple, le mojito et la bière étaient plus consommés que le pastis (Figure 57).

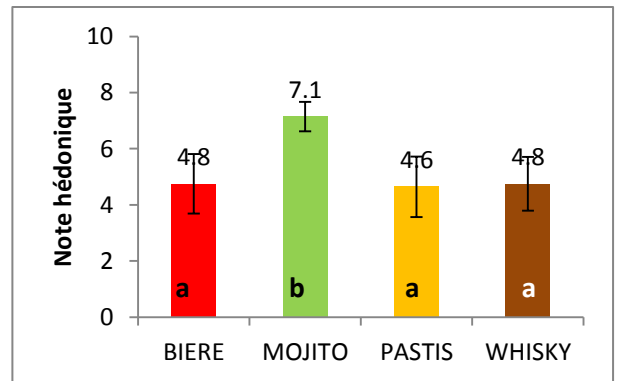


Figure 56. Note hédonique moyenne des produits

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre produits - 2 produits ayant une lettre différente ont une note hédonique différente)

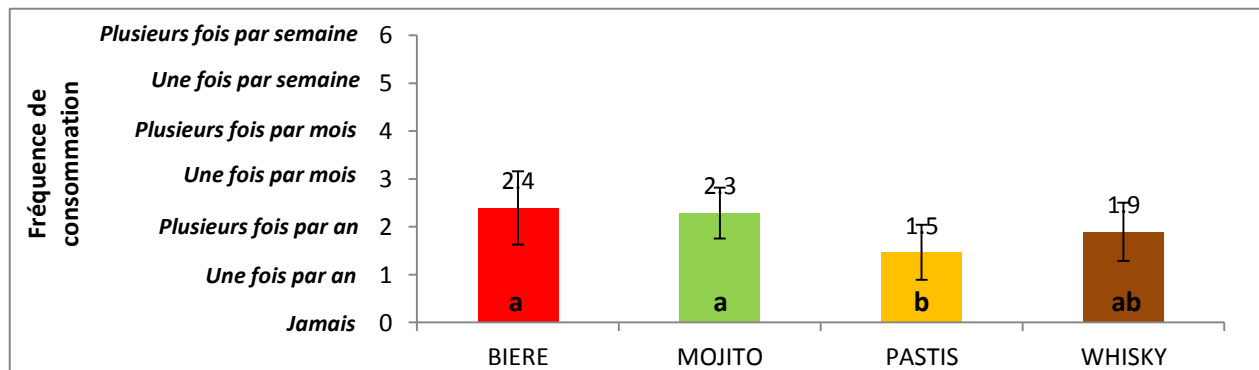


Figure 57. Fréquence de consommation moyenne des produits

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre produits - 2 produits n'ayant aucune lettre en commun ont une fréquence de consommation différente)

Les notes d'appréciation des ambiances ont ensuite été récupérées pour chaque ambiance et chaque sujet et soumises à une **analyse de la variance à 3 facteurs**, sujet, ambiance(type d'ambiance) et type d'ambiance. Les résultats révèlent tout d'abord un effet significatif pour le facteur ambiance(type d'ambiance) [$F(6,189) = 6,83$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,08$] ; les ambiances usine, bureau et voiture étaient moins appréciées que l'ambiance douche, elle-même moins appréciée que les 4 ambiances congruentes (irlandaise, latino, provençale et lounge) (Figure 58(a)). Egaleme nt, les résultats révèlent un effet type d'ambiance [$F(1,189) = 228,1$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,44$] ; les ambiances congruentes ont été préférées aux ambiances non congruentes (Figure 58(b)).

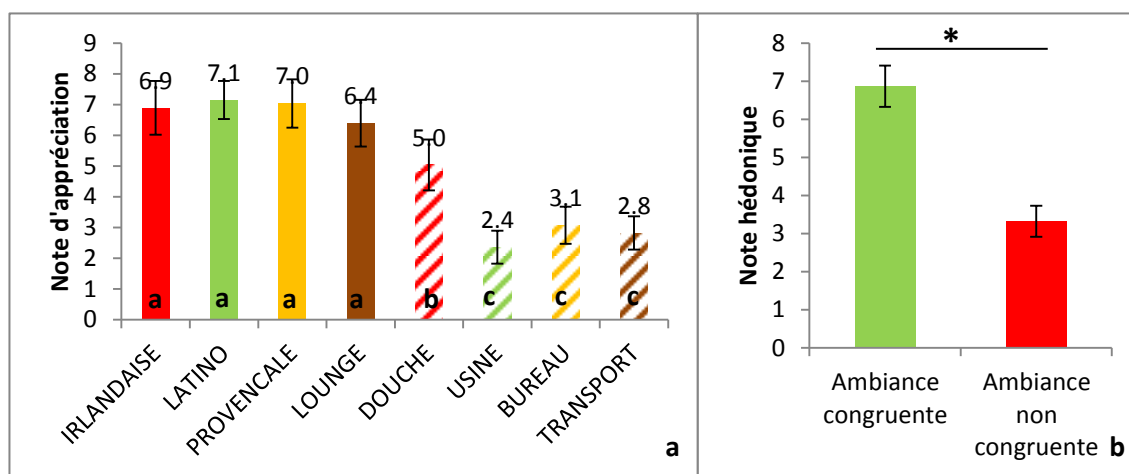


Figure 58. Note hédonique moyenne attribuée aux ambiances et types d'ambiance

(a) Données moyennées par ambiance

(b) Données moyennées par type d'ambiance

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre ambiances - 2 ambiances ayant une lettre différente ont une note d'appréciation différente ; * : différence significative avec $\alpha = 5\%$)

2.3.3. Réactions pupillaires

Comparaison des 4 boissons alcoolisées entre elles (sans amorce)

La Figure 59 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 13 sujets retenus lors de la comparaison entre les différents produits sans amorce (séance amorce produit). Beaucoup de sujets ont dû être supprimés en raison des nombreuses pertes de données en partie dues à la procédure de mise en bouche (perte du signal lorsque les sujets levaient la tête).

L'observation de l'**évolution du pourcentage de variation** pour chacun des produits, contrairement à la précédente expérimentation ne montre pas un franc pic de contraction entre 0 et 2s (Figure 59(a)). Cependant nous observons un retardement de la dilatation pupillaire (le pic de dilatation semble arriver plutôt vers 3s alors qu'on a vu que sans artéfact il était atteint vers 1 ou 1,5s – cf Chapitre 3 : Pupillométrie en situation de dégustation – développement d'une méthodologie), c'est pourquoi nous avons choisi de traiter les données de la même manière que Dietz et al., comme exposé plus haut (2.2.5. Analyse des données). Aussi, il est difficile de voir sur ce graphique si la dilatation pupillaire est différente selon les produits puisque les valeurs de contraction sont variables. Par contre, l'analyse de variance à 2 facteurs, sujet et produit des **pics de dilatation** n'a révélé aucun effet produit, le pic de dilatation était équivalent pour les différentes boissons [$F(3,40) = 0,36$, $p = 0,782$] (Figure 59(b)). Enfin,

cette observation est confirmée par la **comparaison temps par temps** qui ne rapporte aucune différence (Figure 59(c)).

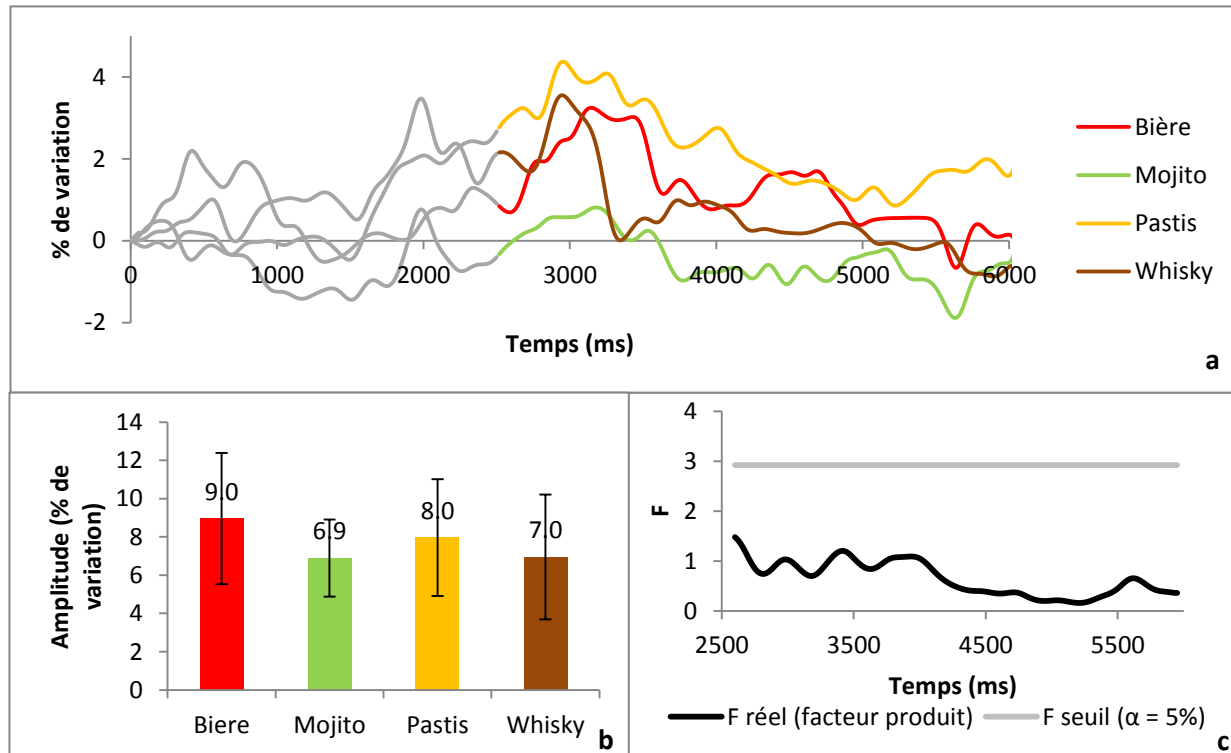


Figure 59. Résultats de la comparaison des 4 boissons alcoolisées

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur produit en fonction du temps*

Comparaison des 8 ambiances entre elles (sans amorce) et des 2 types d'ambiance entre eux

La Figure 60 rapporte l'ensemble des résultats obtenus avec les 14 sujets retenus lors de la comparaison entre les différentes ambiances sans amorce (séance amorce contextuelle).

On observe sur la Figure 60 (a) rapportant l'**évolution du pourcentage de variation** pour chacune des 8 ambiances dans une fenêtre de 10s après le début de l'écoute, une dilatation pupillaire pour l'ensemble des ambiances avec un pic de dilatation autour de 4,5s. Cette dilatation semble supérieure pour les ambiances douche et bureau. Le **pic de dilatation** défini comme le maximum entre 0s et 10s après le début de l'écoute a été calculé pour chaque ambiance et chaque sujet, pour être soumis à une analyse de variance à 2 facteurs, sujet et ambiance. Les résultats révèlent un effet ambiance [$F(7,91)=3,437$, $p=0,003$, $\eta^2=0,039$], les tests de comparaison multiple de Tukey montrent notamment que le pic de dilatation était plus important pour l'ambiance douche par rapport à l'ensemble des ambiances (Figure 60 (b)). Enfin, avec la **comparaison temps par temps**, on note principalement des différences entre 1200 et 1400ms avec un pourcentage de variation plus fort pour les ambiances douche et bureau par rapport aux ambiances voiture, lounge et provençale (test de comparaison multiple appliqué au temps le plus « significatif », 1583ms) et entre 7000 et 9000ms avec un pourcentage de variation plus important pour l'ambiance douche par rapport à l'ensemble des autres ambiances hormis

l'ambiance bureau et un pourcentage de variation plus fort pour l'ambiance bureau par rapport à l'ambiance provençale (test de comparaison multiple appliqué au temps le plus « significatif », 8118ms) (Figure 60(c)). Ces résultats ont été renforcés par les résultats de l'ACP. Pour la période de 1200 à 1400ms, la composante retenue rapportait 91,18% de la variance totale. Cette première composante, corrélée au diamètre moyen de la pupille ($R = 0,999$, $p < 0,001$) a été soumise à une analyse de la variance avec sujet et ambiance comme facteurs. Les résultats révèlent un effet ambiance [$F(7, 91) = 2,41$, $p = 0,026$, $\eta^2 = 0,14$]. Les tests de comparaison multiple de Tukey ont mis en évidence que le signal moyen de 1200ms à 1400ms des ambiances bureau et douche était plus important que celui des ambiances lounge, provençale et voiture, ce qui vient confirmer la première observation. Pour la période de 7000 à 9000ms, la composante retenue rapportait 91,86% de la variance totale. Cette première composante, corrélée au diamètre moyen de la pupille ($R = 0,999$, $p < 0,001$) a été soumise à une analyse de la variance avec sujet et ambiance comme facteurs. Les résultats révèlent un effet ambiance [$F(7, 91) = 2,55$, $p = 0,019$, $\eta^2 = 0,10$]. Les tests de comparaison multiple de Tukey ont mis en évidence que le signal moyen de 7000 à 9000ms de l'ambiance douche était plus important que celui de l'ensemble des ambiances, excepté l'ambiance bureau et que le signal moyen de l'ambiance bureau était supérieur à celui de l'ambiance provençale, confirmant également les premières observations.

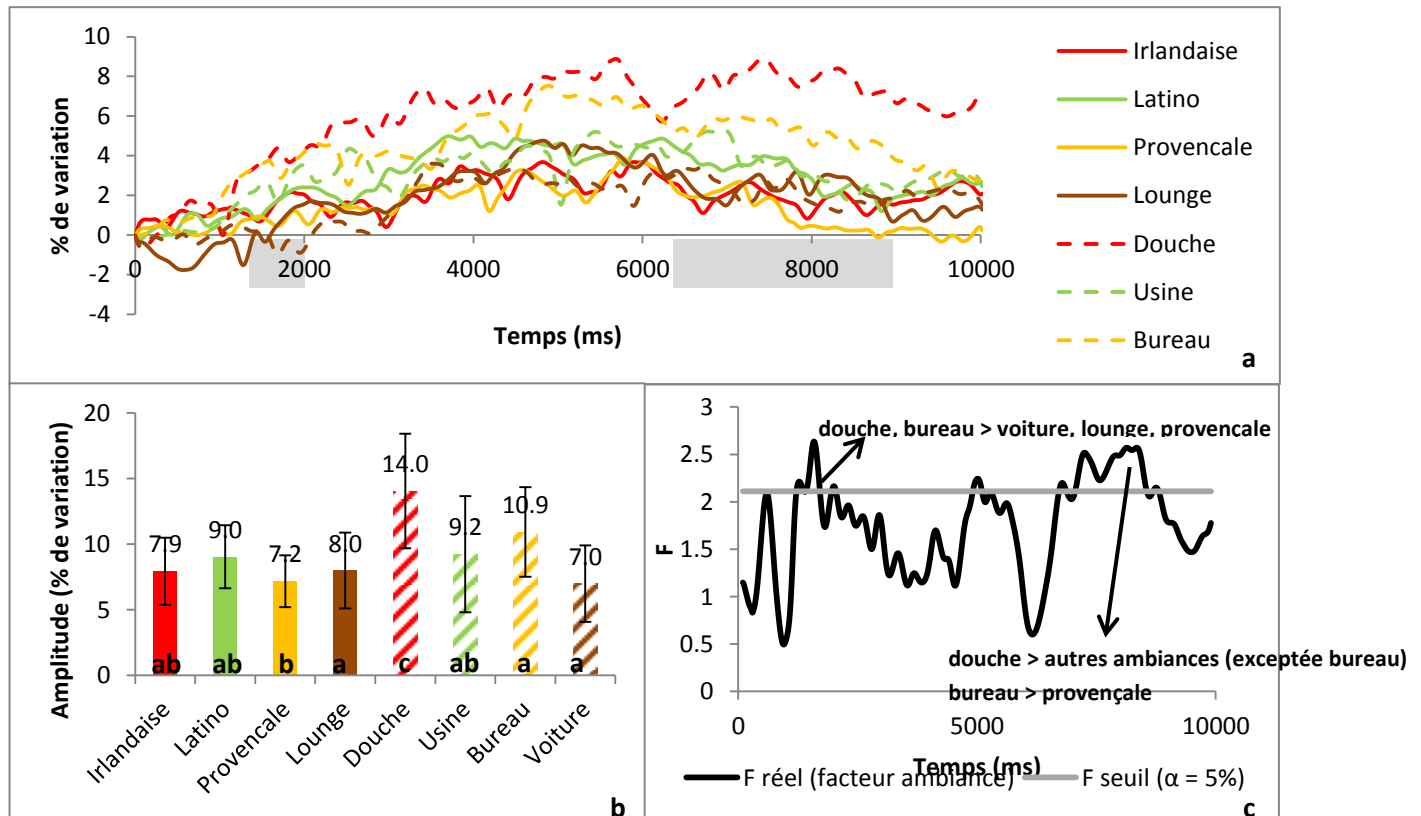


Figure 60. Résultats de la comparaison des différentes ambiances non amorcées

- (a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base** (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)
- (b) Pics de dilatation** (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre ambiances - 2 ambiances n'ayant aucune lettre en commun entraînent un pic de dilatation différent)
- (c) Résultats de la comparaison temps par temps** – Evolution de la statistique F du facteur ambiance en fonction du temps

La Figure 61 rapporte l'ensemble des résultats obtenus avec ces mêmes 14 sujets retenus mais cette fois-ci sur les données moyennées par type d'ambiance (congruentes et non congruentes).

On observe sur la Figure 61 (a) rapportant l'**évolution du pourcentage de variation** pour chaque type d'ambiance dans une fenêtre de 10s après le début de l'écoute, une dilatation pupillaire pour les deux types d'ambiance avec un pic de dilatation autour de 4,5s. Cette dilatation semble équivalente pour les deux types d'ambiance bien que légèrement supérieure pour les ambiances non congruentes, ce qui est cohérent avec les précédentes observations. Le **pic de dilatation** défini comme le maximum entre 0s et 10s après le début de l'écoute a été calculé pour chaque type d'ambiance et chaque sujet pour être soumis à une analyse de variance à 2 facteurs, sujet et type d'ambiance. Les résultats révèlent une tendance pour le facteur type d'ambiance [$F(1,13)=3,73$, $p=0,075$], le pic de dilatation avait tendance à être plus important pour les ambiances non congruentes (Figure 61 (b)). Enfin, avec la **comparaison temps par temps**, les différences observées lors de la comparaison entre ambiances sont reportées, les ambiances non congruentes entraînent une réponse plus importante que les ambiances non congruentes vers 3000ms et 7000ms mais globalement elles sont tout de même relativement équivalentes (Figure 61 (c)).

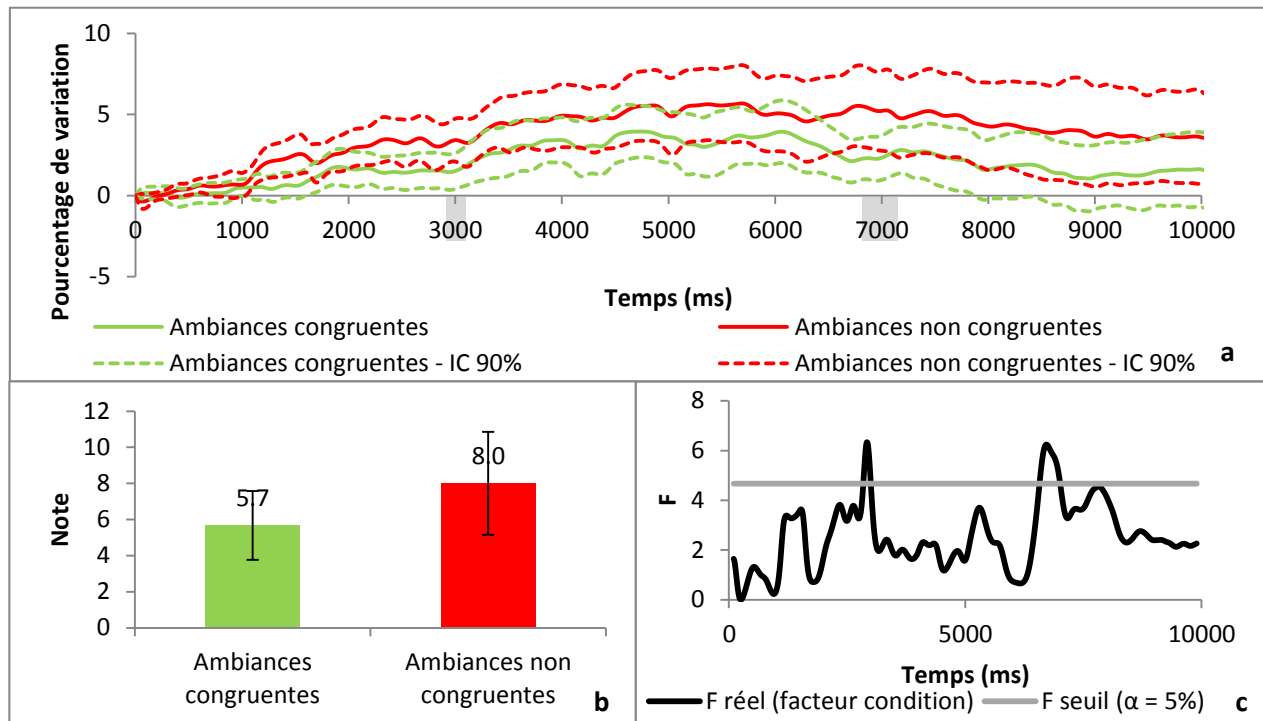


Figure 61. Résultats de la comparaison des deux types d'ambiance non amorcés

(a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)

(b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

(c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur ambiance en fonction du temps

Comparaison des 3 conditions d'amorce (sans amorce, avec amorce congruente, avec amorce non congruente) moyennées sur les 4 boissons alcoolisées

Pour un regard synthétique des données, la Figure 62 rapporte les résultats moyens de la comparaison

des 3 conditions (sans amorce, avec amorce congruente, avec amorce non congruente). L'interprétation des données à partir de l'**évolution du pourcentage de variation** est difficile en raison de l'artéfact dû à la lumière (Figure 62 (a)). Les résultats de l'analyse de la variance à 3 facteurs sujet, produit, condition, et produit * condition des **pics de dilatation** définis comme le maximum de 2,5s à 6s après mise en bouche et le minimum de 0 à 2s (pic de contraction) pour chaque produit, chaque condition et chaque sujet ne révèlent ni effet produit [$F(3,104)=0,739$, $p=0,531$], ni effet condition [$F(2,104)=2,165$, $p=0,120$], ni interaction produit*condition [$F(6,104)=1,595$, $p=0,156$], le pic de dilatation était équivalent pour les différentes boissons et les différentes conditions peu importe la boisson. On observe tout de même une légère tendance pour l'effet condition ; les conditions avec amorce ont tendance à entraîner un pic de dilatation plus important. La Figure 62 (b) rapporte cette observation moyennée sur les boissons. Enfin, lors de la **comparaison temps par temps** sur moyennes mobiles calculées sur les données de 2,5s à 6s corrigées par le retrait de la valeur du pic de contraction moyennées, aucune différence n'apparaît pour les boissons mojito, pastis et whisky, confirmant nos précédentes observations. Pour la bière, en revanche, une différence sur les premières valeurs est apparue. Les résultats du test de comparaison multiple de Tukey montrent que le diamètre pupillaire lors des premiers temps était plus important pour la condition amorce non congruente par rapport à sans amorce. La Figure 62 (c) rapporte ces mêmes résultats sur les données moyennées sur les produits. La différence observée sur les premières valeurs est le report de la différence observée entre les conditions amorce non congruente et sans amorce pour la bière.

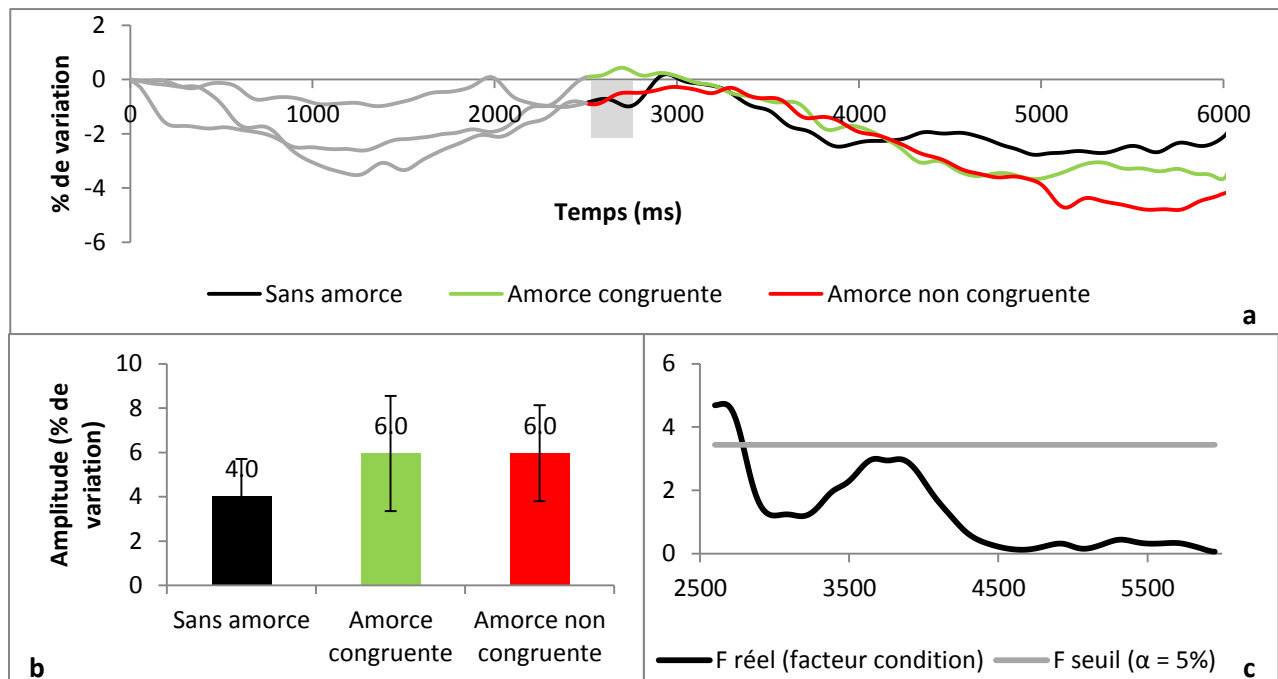


Figure 62. Résultats de la comparaison des différentes conditions (sans amorce, avec amorce congruente, avec amorce non congruente) moyennées sur les boissons

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur condition en fonction du temps*

Comparaison des 2 conditions d'amorce (sans amorce, avec amorce) pour chacune des 4 ambiances congruentes

Toujours pour un regard synthétique sur les données, la Figure 63 rapporte l'ensemble des résultats moyens obtenus lors de la comparaison entre les conditions avec amorce et sans amorce (moyennées sur les ambiances) à partir de 24 sujets retenus. A partir de l'observation de l'**évolution du pourcentage de variation**, il semblerait qu'il n'y ait pas d'effet de l'amorce (Figure 63 (a)). En effet, les résultats de l'analyse de variance à 3 facteurs, sujet, ambiance et condition avec interaction $\text{ambiance} \times \text{condition}$ des **pics de dilatations** ne révèlent ni effet ambiance [$F(3,122)=1,300$, $p=0,277$], ni effet condition [$F(1,122)=0,038$, $p=0,845$], ni interaction $\text{ambiance} \times \text{condition}$ [$F(3,122)=0,769$, $p=0,514$]. La Figure 63 (b) rapporte ces observations moyennées sur les ambiances. Les résultats des comparaisons temps par temps ne révèlent aucune différence pour les ambiances latino, lounge et provençale. Pour l'ambiance irlandaise, seule une différence autour de 500ms a été observée, correspondant à un pourcentage de variation plus important sans amorce qu'avec amorce. La Figure 63 (c) rapporte les résultats des **comparaisons temps par temps** sur moyennes mobiles calculées sur les données de 0 à 10s après le début de l'écoute et moyennées sur les ambiances. On observe une différence au tout début correspondant à la même observation que pour l'ambiance irlandaise, un pourcentage de variation plus important sans amorce qu'avec amorce.

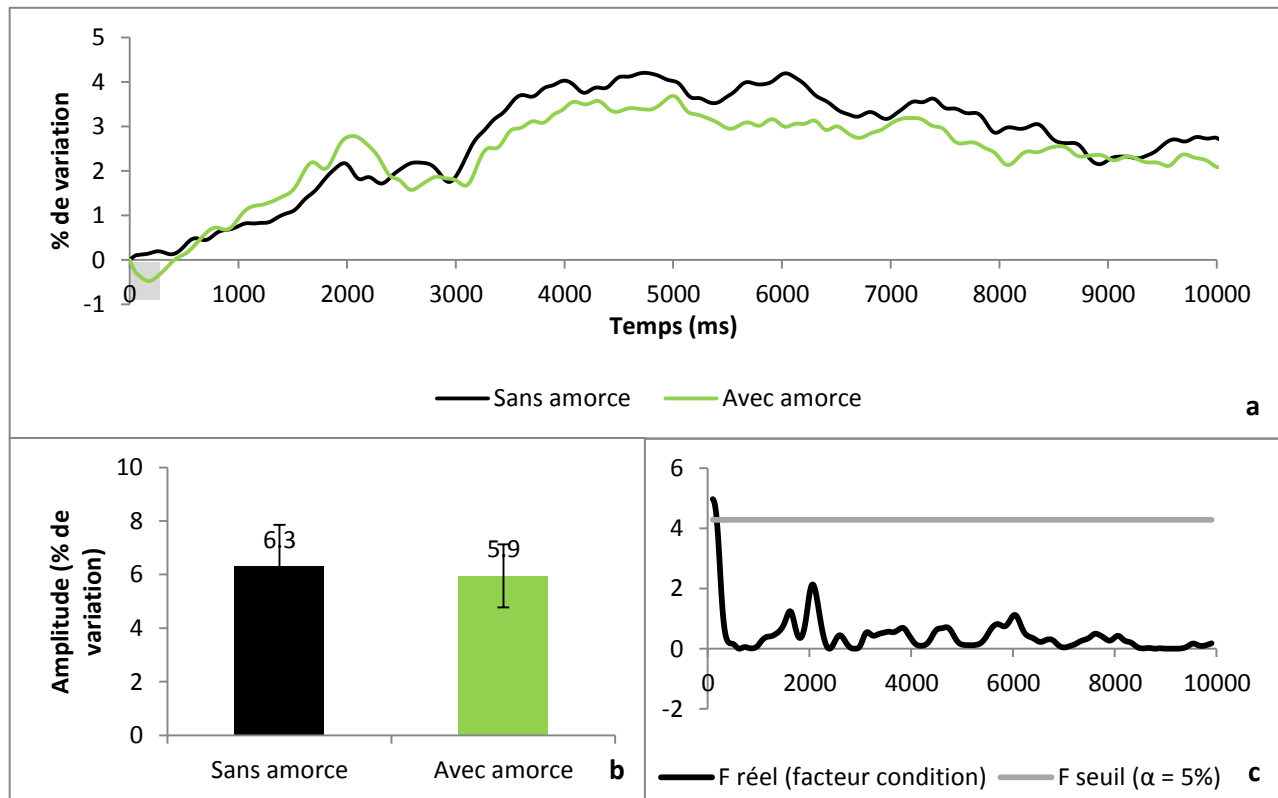


Figure 63. Résultats de la comparaison des conditions sans ou avec amorce moyennées sur les ambiances

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur condition en fonction du temps*

Tableau 36 rapporte les résultats des différentes méthodes pour les différentes comparaisons.

Tableau 36. Résultats des différentes comparaisons obtenus avec les 3 méthodes (Pic de dilatation, Comparaison temps par temps et ACP)

		Pic de dilatation	Comparaison temps par temps	ACP
Boissons	Mojito vs Bière vs Mojito vs Pastis	NS	NS	--
	sans amorce vs avec amorce congruente vs avec amorce non congruente	avec (congruente ou non congruente) amorce (tendance)	au début du signal : amorce non congruente > sans amorce uniquement pour la bière	--
Ambiances	latino vs lounge vs provençale vs irlandaise vs bureau vs douche vs voiture vs usine	douche > autres ambiances bureau > provençale	entre 1200 et 1400ms : douche et bureau > voiture, lounge et provençale entre 7000 et 9000ms : douche > autres ambiances (exceptée bureau) et bureau > provençale	entre 1200 et 1400ms : douche et bureau > voiture, lounge et provençale (p = 0,026) entre 7000 et 9000ms : douche > autres ambiances (exceptée bureau) et bureau > provençale (p = 0,019)
	ambiances congruentes vs ambiances non congruentes	NS	vers 3000ms et 7000ms : non congruente > congruent (périodes très courtes)	--
	sans amorce vs avec amorce	NS	au tout début du signal : avec amorce < sans amorce (très courte période)	--

2.3.4. Corrélation entre réponses pupillaires et données déclaratives

Des différences d'appréciation hédonique ont été observées entre les produits ; le mojito était préféré aux 3 autres produits. Egalement, des différences en termes de fréquence de consommation ont été observées ; le mojito et la bière étaient plus consommés que le pastis. Or, aucune différence en termes de réponse pupillaire n'a été observée entre les produits. Il ne semblerait donc pas y avoir de lien entre l'appréciation hédonique ou la fréquence de consommation et les émotions. Pour confirmer cette hypothèse, la corrélation entre les pics de dilatation et les notes hédoniques et entre les pics de dilatation et les fréquences de consommation ont été calculées. Ces corrélations n'étaient pas significatives (respectivement, $R = 0,11$, $p = 0,415$ et $R = 0,09$, $p = 0,499$).

Au contraire, pour les ambiances, des différences en termes de réponse pupillaire ont été observées ; des différences ont été notées sur deux périodes, de 1200 à 1400ms et de 7000 à 9000ms.

De 1200 à 1400ms, la réaction pupillaire des ambiances douche et bureau était supérieure à celle des ambiances lounge, provençale et voiture. De 7000 à 9000ms, la réaction pupillaire de l'ambiance douche était supérieure à celle de toutes les autres ambiances (exceptée l'ambiance bureau) et celle de l'ambiance bureau, supérieure à celle de l'ambiance provençale. Cependant, cela ne semble pas aller dans le sens de la préférence. En effet, le traitement des données d'appréciation des ambiances a mis en évidence une préférence pour les 4 ambiances congruentes (latino, lounge, provençale et irlandaise) par rapport aux 4 autres ambiances, une appréciation intermédiaire pour l'ambiance douche et une appréciation plus faible pour les ambiances usine, bureau et transport. Cette observation est confirmée par le calcul de la corrélation entre les pics de dilatation et les notes hédoniques qui n'était pas significative ($R = 0,06$, $p = 0,489$). Pour compléter ces résultats, les coordonnées sur la première composante des ACP ont été récupérées. Les corrélations calculées entre (1) les coordonnées sur la première composante pour la 1^{ère} période (1200-1400ms), (2) les coordonnées sur la première composante pour la 2^{ème} période (7000-9000ms) et les notes hédoniques n'étaient pas significatives (respectivement $R = -0,07$, $p = 0,475$ et $R = 0,03$, $p = 0,751$).

2.4. Conclusion

Hypothèse n°1 : « Il existe une réponse pupillaire consécutive à la mise en bouche de boissons alcoolisées traduisant la présence d'émotions et pouvant être impactée par un amorçage contextuel. »

Cette expérience a permis de mettre en évidence une dilatation pupillaire pour les 4 boissons alcoolisées testées, mojito, pastis, bière et whisky suggérant une nouvelle fois, la présence d'émotions. Il semblerait que celles-ci ne soient pas liées à la préférence. En effet, bien que le mojito ait été préféré aux 3 autres produits, la dilatation pupillaire était équivalente pour l'ensemble des produits. Ceci a été confirmé par l'étude de corrélation entre les réponses pupillaires et les notes hédoniques. On a alors deux possibilités, (1) la dilatation observée transcrit bien l'émotion et alors on confirmerait que les émotions ne sont pas liées aux préférences ou (2) la dilatation observée n'est que le résultat de la stimulation, et alors il serait normal de ne pas observer de lien avec les préférences. Pour répondre à cette interrogation il suffit de regarder les résultats rapportés dans le chapitre 4. En réalité, nous n'avons pas pu utiliser exactement ces résultats puisqu'ils n'ont pas été obtenus de la même manière (pas d'artéfact lumière). Comme nous l'avons précisé, l'expérimentation rapportée dans ce chapitre avait dans un premier temps été réalisée dans les mêmes conditions qu'ici, nous avons donc le même artéfact. Afin d'avoir des données comparables, les données avec artéfact ont été traitées de la même manière, c'est-à-dire selon l'inspiration de la méthode de Dietz et al. (2011). Les résultats obtenus sur les solutions hydro-alcooliques sont résumés dans le Tableau 37. Nous avons pour la bière, le mojito, le pastis et le whisky des pics de variation de respectivement 9,0%, 6,9%, 8,0% et 7,0%. La bière est un produit amer et gazeux, et pourtant son pic de variation est inférieur aux solutions amères et gazeuses. De la même manière le Mojito et le Pastis sont des produits sucrés et pourtant leur pic de variation est inférieur au pic de variation moyen des solutions sucrées. Enfin, même chose pour le whisky, nous avons un pic de variation inférieur à celui d'une solution à 40% d'alcool. Cela semblerait confirmer que la dilatation pupillaire ne résulte que de la stimulation, **les produits auraient ainsi un pouvoir émotionnel trop faible pour être mesuré par la pupille**. Cependant, attention, n'oublions pas que ces données ont été perturbées par l'artéfact de la lumière et donc la conclusion doit être confirmée.

Tableau 37. Pics de variation observés pour les solutions hydro-alcooliques lors de la recherche des effets des stimuli chimiosensoriels lors de la première réalisation (avec artéfact lumière)

	Pic de variation observé						Effet
	N0	N1	N2	N3	N4	MOY	
Sucrées	9,2	9,6	11,4	5,8	7,5	8,6	Non
Amères	10,7	10,6	14,8	10,4		11,9	Non
Gazeuses (CO2)	7,3	12,4	8,1	9,4		10,0	Non
Alcool	6,2	8,1	9,7	7,8	7,4	8,3	Non

Hypothèse n°2 : « Il existe une réponse pupillaire durant l'écoute d'ambiances traduisant la présence d'émotions et pouvant être impactée par un amorçage produit ».

La pupille dilate également durant l'écoute d'ambiance ; les 8 ambiances testées, latino, lounge, provençale, irlandaise, voiture, bureau, usine et douche ont entraîné une dilatation pupillaire. De plus, des différences entre les ambiances ont été observées ; principalement, l'ambiance douche a entraîné une dilatation supérieure à toutes les autres ambiances et portées par l'ambiance douche, les ambiances non congruentes ont entraîné en moyenne une plus forte dilatation que les ambiances non congruentes. Cependant, on ne note une nouvelle fois pas de lien avec les préférences puisque l'ambiance douche a été moins appréciée que les 4 ambiances congruentes, latino, lounge, provençale et irlandaise et globalement, les ambiances non congruentes ont été moins appréciées que les ambiances congruentes. Et d'ailleurs, aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre les réponses pupillaires aux ambiances et les notes d'appréciation. Cependant, bien que l'ambiance douche n'ait pas été la plus appréciée, au déclaratif spontané, les sujets avaient tendance à dire que c'est l'ambiance qui les « amusait » le plus, leur « parlait » le plus. On pourrait donc penser que la dilatation pupillaire puisse être liée à un niveau d'évocation, ou à un amusement. Notons d'ailleurs qu'avec un pic de variation de 14% pour l'ambiance douche, nous sommes largement au-dessus des pics de variations observés pour les solutions aqueuses ou hydro-alcooliques dans les mêmes conditions (pas d'artéfact dû à la lumière) qui vont de 2,8% à 8,3% avec une moyenne de 4,7%. Et d'ailleurs **on pourrait penser à un pouvoir émotionnel des ambiances plus fort que pour les produits** au vu du niveau de dilatation observé (en moyenne, 9,1% pour les ambiances contre 7,7% pour les produits), ceci irait dans le sens **d'un fort pouvoir émotionnel du contexte**, mais les données sont difficilement comparables en raison de l'artéfact dû à la lumière pour les produits.

Enfin, que ce soit pour les produits ou pour les ambiances, il semblerait qu'il n'y ait pas d'effet d'amorce sur la réponse pupillaire. **Le pouvoir émotionnel des produits et des ambiances serait ainsi le même avec ou sans amorce, les émotions ne s'additionneraient pas.**

3. Expérience 3 – Stimuli gustatifs en contexte (Agréable vs Désagréable)

3.1. Objectifs

Cette étude avait pour objectifs :

- d'évaluer le **pouvoir émotionnel** de différents **produits** par la mesure de la réponse pupillaire consécutive à leur dégustation
- d'évaluer le **pouvoir émotionnel** de **musiques** (avec des musiques soit appréciées, soit non appréciées) par la mesure de la réponse pupillaire durant leur écoute

- d'étudier le **lien** entre les **données déclaratives (hédoniques et émotionnelles)** et les **réponses pupillaires**
- d'étudier **l'impact de l'émotion provoquée par la musique** sur la **réponse pupillaire** consécutive à la dégustation des produits par la comparaison des réponses pupillaires consécutives à cette dégustation dans les différentes conditions (différentes musiques)
- d'étudier **l'impact d'une amorce émotionnelle** (les musiques) positive ou négative sur **l'appréciation hédonique** des produits

Nos hypothèses étaient les suivantes :

Hypothèse n°1 : « Il existe une réponse pupillaire durant l'écoute de musique et consécutive à la dégustation de produits traduisant la présence d'émotion mais non liée à la valence mais à l'intensité »

Hypothèse n°2 : « Les émotions provoquées par le produit et la musique s'additionnent lors d'une présentation simultanée et cela est traduit par une réponse pupillaire plus importante »

Hypothèse n°3 : « L'émotion provoquée par la musique a un impact sur l'appréciation hédonique des produits »

3.2. Méthodes

3.2.1. Participants

46 sujets au total ont été recrutés par une société d'étude (23 hommes et 23 femmes), avec pour âge moyen 37,85 ans (erreur standard = 2,14) (cf annexe n°4 pour le questionnaire de recrutement). Tous les participants avaient une vue normale ou corrigée à la vision normale et étaient consommateurs au moins occasionnels (au moins une fois par an) des produits testés. Pour les remercier de leur participation, ils recevaient une indemnité de 20 € par séance.

3.2.2. Appareil et installation

Le **matériel** utilisé était le suivant :

- Ecran Tobii d'eye tracking T60
- Ordinateur portable avec le logiciel Tobii Studio
- Matériel pour la préparation des produits
- Ordinateur portable pour la diffusion des musiques + casque

Les tests ont été réalisés dans une pièce privée de la lumière du jour. La **luminance** de l'écran s'élevait à 0,30 cd/m². Une nouvelle fois cette expérimentation a été faite en amont de la définition des paramètres optimaux, c'est pourquoi ces valeurs ne respectent pas nécessairement les recommandations faites.

3.2.3. Tâches et stimuli

Trois **principales tâches** étaient réalisées par chaque sujet, dans l'ordre, une tâche d'**écoute**, une tâche de **dégustation** et une tâche d'**évaluation** (questionnaires). La tâche d'écoute consistait à écouter une musique pendant 1 minute, le sujet avait simplement comme consigne d'écouter. La tâche de dégustation consistait à consommer un produit (mise en bouche et déglutition), sa durée était fixée à 20s, le sujet dégustait l'équivalent d'une gorgée ou d'une bouchée selon le produit. La diffusion de la musique se poursuivait lors de la tâche de dégustation. La troisième et dernière tâche consistait à

répondre à deux questionnaires, l'un hédonique, le sujet devait évaluer son appréciation de la musique et du produit et l'autre émotionnel, le sujet devait évaluer son état émotionnel au travers d'items d'émotions.

Il y avait trois **conditions musicale**, « musique appréciée », « musique non appréciée » et « silence », cette dernière étant la situation contrôle. Nous avons choisi d'utiliser la musique pour générer des émotions chez les sujets. Une musique était considérée comme vecteur d'émotions positives lorsqu'elle plaisait au sujet ou au contraire comme vecteur d'émotions négatives lorsqu'elle ne lui plaisait pas. Les musiques étaient définies sujet par sujet grâce à des données recueillies lors du recrutement. Chaque sujet devait indiquer 10 titres de chansons qu'il aimait et 1 ou 2 interprètes et styles de musiques qu'il n'aimait pas. A partir de ces données 6 titres appréciés et 6 titres non appréciés étaient définis par sujet.

Les **produits testés** étaient au nombre de 6 et de 3 types, jus d'orange, gâteau génoise fourrée aux fruits (type Pim's) et pâte à tartiner. Ces produits ont été choisis car on voulait des produits simples à consommer, appréciés de la majorité des personnes et consommables à toute heure de la journée. Pour chaque type de produit, deux variantes avaient été choisies, l'une de marque nationale, l'autre de marque de distributeur (MDD). Pour définir ces variantes nous avons goûté en interne à l'aveugle différentes marques (entre 3 et 5) pour chaque type de produit. Pour chaque type de produit, le préféré et le moins aimé ont été sélectionnés. Le Tableau 38 rapporte cette sélection.

Tableau 38. Produits sélectionnés pour l'étude

Type de produits	Marques	
Jus d'orange	Nationale	Tropicana (pur jus)
	MDD	Carrefour (à base de concentré)
Gâteau (framboise)	Nationale	Pim's
	MDD	Carrefour discount
Pâte à tartiner	Nationale	Nutella
	MDD	Carrefour discount

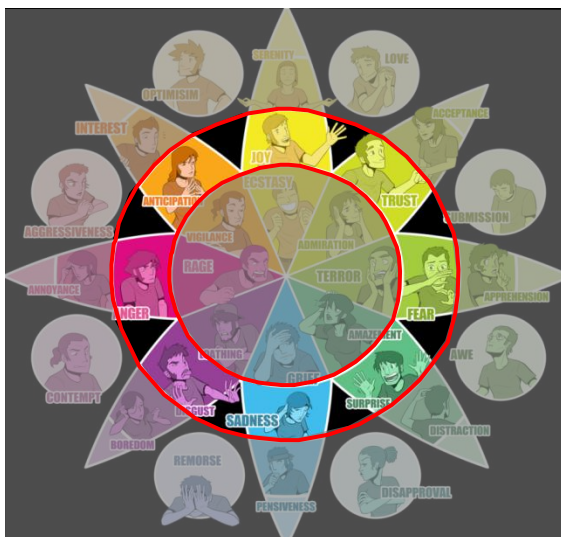


Figure 64. Emotions de base représentées dans le modèle de Plutchik (2001)

Enfin, le **questionnaire hédonique** permettait au sujet d'évaluer le produit et la musique sur une échelle en attribuant une note de «Je n'aime pas du tout» (0) à "j'aime vraiment beaucoup" (10) pour chacun. Le **questionnaire émotionnel** avait pour objectif de permettre au sujet d'évaluer son propre état émotionnel, il lui était demandé « comment il se sentait maintenant ». Pour cela, le sujet devait évaluer l'intensité de 8 émotions de «Pas du tout» (1) à «Extrêmement» (5). Les 8 items d'émotions choisis étaient attirance, colère, dégoût, excitation, joie, peur, surprise et tristesse. Ces émotions sont des émotions dites « émotions de bases » que nous avons extraites de la roue des émotions de Plutchik (2001) (Figure 64).

3.2.4. Procédure

Chaque séance correspondait à une condition musique : silence, musique appréciée ou musique non appréciée. Nous avons préféré séparer les trois conditions pour éviter des effets de report au sein d'une séance. Tous les participants commençaient par la condition « silence ». Ensuite, la moitié des participants poursuivait avec la condition « musique appréciée », puis avec la condition « musique non appréciée », l'autre moitié avec l'ordre inverse. La présentation des différentes associations produit/musique était équilibrée entre les sujets (cf annexe n°1 pour le plan d'expérience).

La procédure de mesure se déroulait en 6 étapes :

- une **phase de repos** de **5s** pour la mesure de la ligne de base
- une **phase d'écoute** de **1minute** pour l'enregistrement de la réponse pupillaire durant l'écoute des musiques
- une nouvelle **phase de repos** de **5s** toujours pour la mesure de la ligne de base
- une **phase de dégustation** de **20s** pour l'enregistrement de la réponse pupillaire consécutive à la dégustation des produits
- une **phase de questionnaires** pour le recueil de l'appréciation de la musique et du produit et le recueil de l'état émotionnel du sujet
- une **phase de rinçage** de **40s** permettant également le repos des yeux (Figure 65)

Ces 6 étapes étaient répétées 6 fois dans une séance puisque l'ensemble des 6 produits était dégusté dans chaque condition.

Le test se déroulait en 4 étapes :

1. **Installation du sujet et explication de la séance.**

Le sujet était installé à environ 60 cm de l'écran. Afin de minimiser la sollicitation des yeux et la réflexion, des consignes identiques pour tous les sujets lui étaient lues :

« Vous allez participer à une séance visant à voir la réaction de vos yeux lorsque vous consommez différents produits et écoutez différentes musiques. La séance va se répéter dans l'ordre suivant, phase de repos, phase d'écoute, phase de repos, phase de dégustation, phase de questionnaires et phase de rinçage. Avant et pendant chaque phase de dégustation et d'écoute il sera important de garder les yeux sur l'écran. La phase d'écoute consistera simplement à écouter une musique qui sera diffusée dans ce casque. La phase de dégustation consistera à mettre en bouche l'équivalent d'une gorgée ou d'une bouchée d'un produit. La phase questionnaires consistera

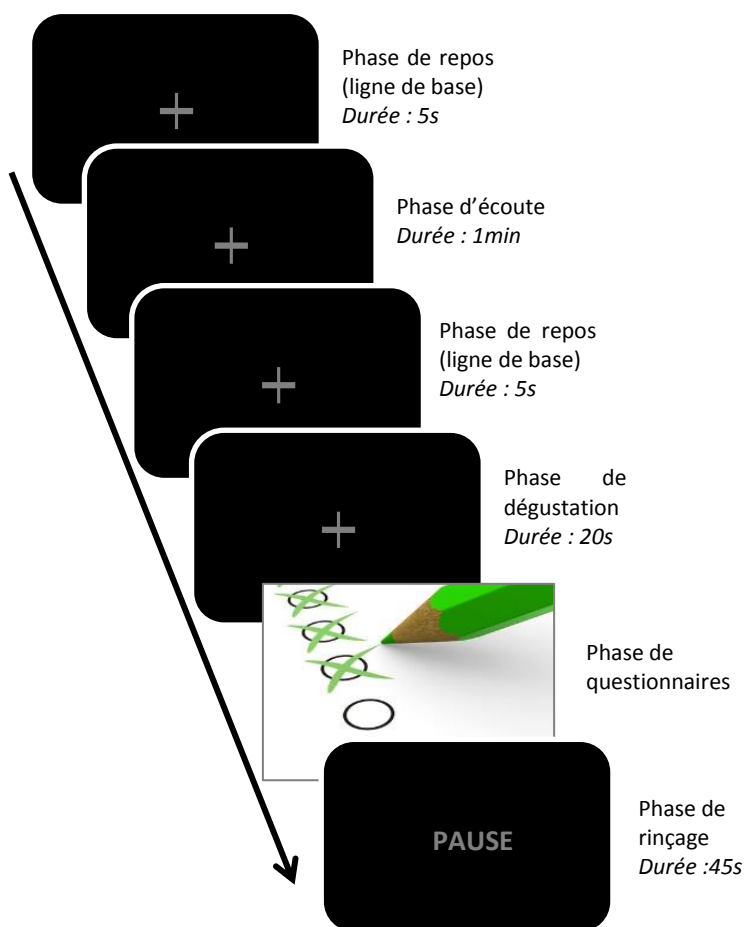


Figure 65. Procédure du test

à remplir 2 questionnaires, l'un avec lequel vous devrez évaluer votre appréciation du produit et de la musique, l'autre avec lequel vous devrez évaluer votre état émotionnel à partir de 8 items d'émotion. Enfin la phase de rinçage consistera à vous rincer la bouche avec de l'eau. Seulement durant cette phase et durant la phase de questionnaires vous aurez la liberté de ne pas fixer l'écran. La phase de rinçage vous sera indiquée à l'écran et durera environ 40s, je vous indiquerai le moment du retour en phase d'écoute.

Avez-vous des questions ?

Nous allons maintenant commencer par la calibration de l'appareil puis nous réaliserons un essai avec de l'eau et nous passerons au test.»

2. **Calibration** de l'eye-tracker.
3. **Essais à blanc.**
4. **Mesures.**

Le test démarrait une fois la calibration effectuée, et les consignes comprises par le sujet.

3.2.5. Analyse des données

Appréciation des produits

Les notes d'appréciation données aux produits lors de la condition silence ont dans un premier temps été récupérées pour chaque produit et chaque sujet et soumises à une **analyse de la variance à 3 facteurs**, sujet, type de produit et marque, avec interaction, type de produit * marque. Des tests de **comparaison multiple de Tukey** ont été appliqués afin de déterminer entre quels produits il existe des différences significatives. Les analyses statistiques ont été conduites en utilisant le logiciel statistique Statistica 10 (© StatSoft).

Réactions pupillaires

Les données ont tout d'abord été extraites comme rapporté dans le chapitre 3 (2.1. Extraction des données) de 1s avant stimulus pour permettre le calcul de la ligne de base à 2,5s après stimulus pour l'étude de la réaction spécifique au stimulus.

Une nouvelle fois, tous **les enregistrements avec plus de 35% de valeurs manquantes ont été exclus des analyses** (34,0%) (cf Chapitre 4 – 2.5 Analyse de données pour le choix du seuil). Pour cette expérimentation, plus que pour les autres encore, le nombre de données perdues a été relativement important. En effet, la salle dans laquelle se sont déroulés les tests était une salle louée à la société de service NetEtudes et nous n'y avons eu que très peu accès avant le test, ce qui ne nous a absolument pas permis d'optimiser les conditions notamment de luminosité qui se sont avérées plutôt médiocres.

Ensuite, les **réactions pupillaires** dans la condition silence ont dans un premier temps été **comparées entre les 2 variantes** de chaque type de produit. Ces réponses pupillaires ont ensuite été moyennées par type de produit et les **réactions pupillaires moyennes de chaque type de produit ont été comparées aux variations naturelles de la pupille puis, comparées entre elles**. De la même façon, pour la musique, les réactions pupillaires de chaque type de musique ont été comparées aux variations naturelles du diamètre pupillaire puis comparées entre elles. Enfin, les réponses pupillaires aux produits ont été moyennées par condition (silence, musique appréciée, musique non appréciée) et ces réactions moyennes ont été comparées entre conditions. Pour chaque comparaison on a pris garde à ce que les signaux comparés soient récupérés à partir des mêmes sujets. A savoir, lorsque les données d'un sujet

étaient exclues sur un des produits/musiques comparé(e)s alors ce sujet était exclu de l'analyse. Ceci permettait d'éliminer au maximum le bruit dû aux variations interindividuelles.

Une **correction de la ligne de base** a été appliquée telle que définie dans le chapitre 3 (3. Traitement de données) pour chacun des produits et chacune des ambiances et les données ont été exprimées en pourcentage de variation. Egalement, les différentes méthodes rapportées dans ce même chapitre, à savoir, le **tracé des courbes**, la **comparaison des pics de dilatation**, la **comparaison temps par temps** et l'**ACP** (lorsque elle était appropriée) ont été appliquées telles qu'elles ont été définies.

Questionnaire d'émotions

L'analyse du questionnaire d'émotions a été réalisée en 2 étapes :

- **Analyse en Composantes Principales (ACP)** : L'ACP réalisée avait pour observations, les questionnaires (un sujet * une condition) et pour variables, les items d'émotion et avait pour objectif d'offrir une représentation graphique multivariée de l'espace émotionnel
- **Analyses de la variance** : Une analyse de la variance à 4 facteurs (sujet, musique, type de produit, marque) avec interactions (musique*type de produit, musique*marque et type de produit*marque) a été réalisée pour chaque item d'émotion afin de déterminer si les produits et musiques entraînaient des émotions différentes. Lorsque cela était approprié, des tests de comparaison multiple de Tukey ont été utilisés afin de déterminer entre quelles conditions il existait des différences significatives.

Liens entre la pupille, les données hédoniques et les données de l'émotion

Les différentes réponses pupillaires ont été observées en parallèle des données hédoniques et émotionnelles.

Impact de la musique sur la notation hédonique

Les notes d'appréciation ont enfin été récupérées pour chaque produit et chaque sujet dans chacune des 3 conditions afin d'être soumises par produit à une **analyse de la variance à 4 facteurs**, sujet, type de produit, variante et condition avec interactions (type de produit * condition, marque * condition et type de produit * marque * condition). Des tests de comparaison multiple de Tukey ont été appliqués afin de déterminer entre quelles conditions il existait des différences significatives. Les analyses statistiques ont été conduites en utilisant le logiciel statistique Statistica 10 (© StatSoft).

3.3. Résultats

3.3.1. Appréciation des produits

Les notes d'appréciation de la condition silence (notes « témoins ») ont été récupérées pour chaque produit et chaque sujet. Ces notes ont ensuite été soumises à une **analyse de la variance à 3 facteurs**, sujet, type de produit et marque, avec interaction, type de produit * marque. Les résultats révèlent un effet significatif pour le facteur type de produit [$F(2,225) = 3,12$, $p = 0,046$, $\eta^2 = 0,02$] mais pas pour le facteur marque pour lequel seule une tendance est observée [$F(1,225) = 3,57$, $p = 0,060$] (Figure 66). Les tests de comparaison multiple de Tukey appliqués afin de déterminer entre quels produits il existe des différences significatives montrent que les sujets donnent un meilleur score à la pâte à tartiner

(M = 7,54, erreur standard = 0,25) qu'au jus d'orange (M = 6,80, erreur standard = 0,25) et ont tendance à donner un meilleur score à la marque nationale (M = 7,41, erreur standard = 0,20) qu'à la marque distributeur (M = 6,94, erreur standard = 0,22). L'interaction type de produit * variante n'est pas significative [$F(2, 225) = 1,72, p = 0,182$]. Cependant, l'observation du graphique des interactions nous montre que nous avons une tendance, l'effet marque serait plus fort pour la pâte à tartiner (Figure 67).

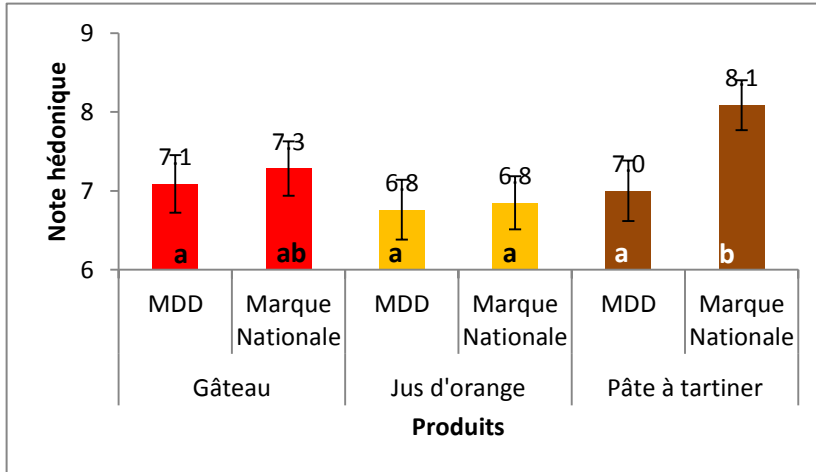


Figure 66. Notation hédonique moyenne des produits
(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre produits - 2 produits n'ayant aucune lettre en commun ont une note hédonique différente)

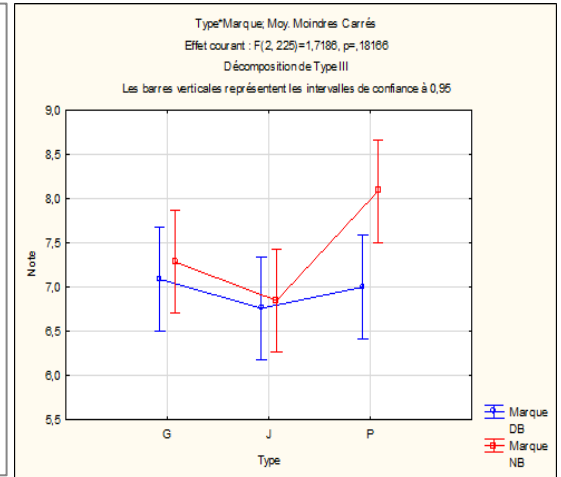


Figure 67. Graphique des interactions type de produit * marque

3.3.2. Réactions pupillaires

Le premier objectif est de vérifier notre première hypothèse : « Il existe une réponse pupillaire durant l'écoute de musique et consécutive à la dégustation de produits traduisant la présence d'émotion mais non liée à la valence mais plutôt à l'intensité ». Pour cela nous allons observer les réponses pupillaires consécutives à la mise en bouche des produits et durant l'écoute des musiques. Egalement, ces deux types de réponse seront comparés.

Réponses pupillaires consécutives à la mise en bouche des produits

Dans un premier temps, la réponse pupillaire consécutive à la mise en bouche des produits a été **comparée entre les 2 variantes** de chaque type de produit. Le pic de dilatation défini comme le maximum entre 0s et 2,5s après la mise en bouche a été calculé pour chaque variante de chaque produit et chaque sujet pour être soumis à une analyse de variance 2 facteurs, sujet et variante pour chaque type de produit. Les résultats ne mettent en évidence aucun effet variante [Pâte à tartiner: $F(1, 11) = 1,44, p = 0,256$; Jus d'orange: $F(1,17) = 0,80, p = 0,383$; Gâteau de framboise: $F(1,9) = 0,83, p = 0,387$]. Les résultats des comparaisons temps par temps sur moyennes mobiles calculées sur les données de 0 à 2,5s après mise en bouche confirment cette observation ne mettant en évidence aucune différence significative entre les variantes pour les trois types de produits. Les réponses pupillaires des deux variantes de chaque type de produit étant équivalentes, on a alors poursuivi les analyses en les moyennant.

On a ensuite **comparé chaque réponse pupillaire consécutive aux produits, aux variations naturelles de la pupille**. La Figure 68(a) rapporte l'**évolution du pourcentage de variation** par rapport à la ligne de base pour chacun des 3 types de produit dans une fenêtre de 2,5s après la mise en bouche. Egalement, les variations naturelles de la pupille sont représentées par l'évolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base lors de l'absence de stimulus, enregistrée lors de la phase d'écoute de la condition silence. Ceci permet de savoir si les dilatations pupillaires consécutives aux différents produits sont significativement différentes des variations naturelles de la pupille. On observe une dilatation significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille pour chaque type de produit. Les résultats des **comparaisons temps par temps** confirment cette observation en mettant en évidence pour chacun des produits, au moins une période où la réponse pupillaire au produit était significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille [Pâte à tartiner: 248,5 ms-1601,5ms | 2311ms-fin; Jus d'orange: 925ms-1816ms | 2195,5ms-fin; Gâteau de framboise: 661ms-end] (Figure 68 (b)). Enfin, ces résultats ont été renforcés par les résultats de l'ACP. Pour chaque ACP, une seule composante a été retenue et rapportait, respectivement pour la comparaison de la pâte à tartiner, du jus d'orange et du gâteau au silence, 87,21%, 83,96% et 89,36% de la variance totale. Cette première composante, corrélée au diamètre moyen de la pupille pour les trois comparaisons (pâte à tartiner: $R = 0,998$, $p < 0,001$; jus d'orange $R = 9,99E-01$, $p < 0,001$; gâteau aux framboises $R > 9,99E-01$, $p < 0,001$) a été soumise à une analyse de la variance avec sujet et condition (produit ou silence) comme facteurs. Les résultats révèlent un effet condition pour les trois types de produits [Pâte à tartiner: $F(1, 21) = 9,69$, $p = 0,005$, $\eta^2 = 0,23$; Jus d'orange: $F(1,23) = 6,08$, $p = 0,02$, $\eta^2 = 0,15$; Gâteau de framboise: $F(1,18) = 7,59$, $p = 0,013$, $\eta^2 = 0,15$].

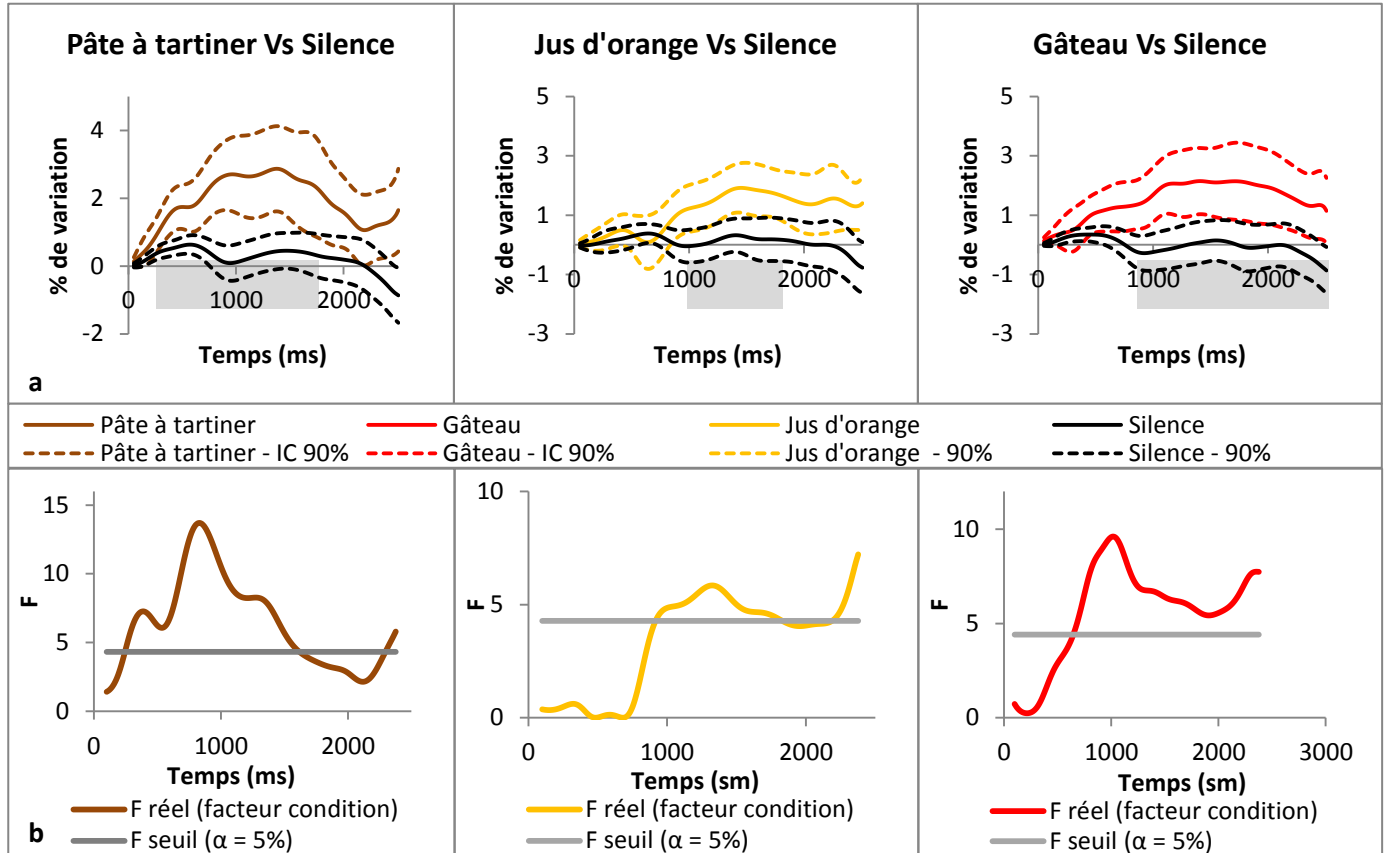


Figure 68. Comparaison de chaque type de produit aux variations naturelles de la pupille

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)*
- (b) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur condition en fonction du temps*

On a ensuite **comparé les réponses pupillaires de chaque type de produit** (Figure 69(a)). Le pic de dilatation a été calculé pour chaque type de produit et chaque sujet pour être soumis à une analyse de variance avec sujet et produit comme facteurs. Les résultats révèlent des pics de dilatation équivalents pour les trois types de produit [$F(2, 28) = 1,23$, $p = 0,307$] (Figure 69 (b)). Cependant, la comparaison temps par temps sur moyennes mobiles a mis en évidence une différence de 1981ms à 2311ms (Figure 69 (c)). Les résultats de l'ACP réalisée sur les données de 1981ms à 2311ms confirment ce résultat. La première composante qui transcrit le diamètre moyen de la pupille de 1981ms à 2311ms ($R^2 > 9,99E-01$, $p < 0,001$) a été soumise à une analyse de la variance avec sujet et condition comme facteurs. Les résultats révèlent un effet produit [$F(2,28) = 6,17$, $p = 0,006$, $\eta^2 = 0,07$]. Les tests de comparaison multiple de Tukey ont montré que les scores sur la première composante étaient plus élevés pour le jus d'orange ($M = 3,92$, erreur standard = 2,71) que pour la pâte à tartiner ($M = -2,71$, erreur standard = 2,48) et le gâteau ($M = -1,21$, erreur standard = 2,80). Cela signifie que le diamètre moyen de la pupille était plus élevé pour le jus d'orange que pour la pâte à tartiner et le gâteau de 1981ms à 2311ms, temps inclus dans le retour à l'état initial (retour à la ligne de base). Ainsi, le pic de la dilatation était équivalent pour les trois types de produit, mais le retour à la ligne de base a été plus rapide pour la pâte à tartiner et le gâteau par rapport au jus d'orange, ce qui pourrait traduire une

charge émotionnelle équivalente mais plus soutenue/moins brève suite à la dégustation de jus d'orange par rapport aux autres produits.

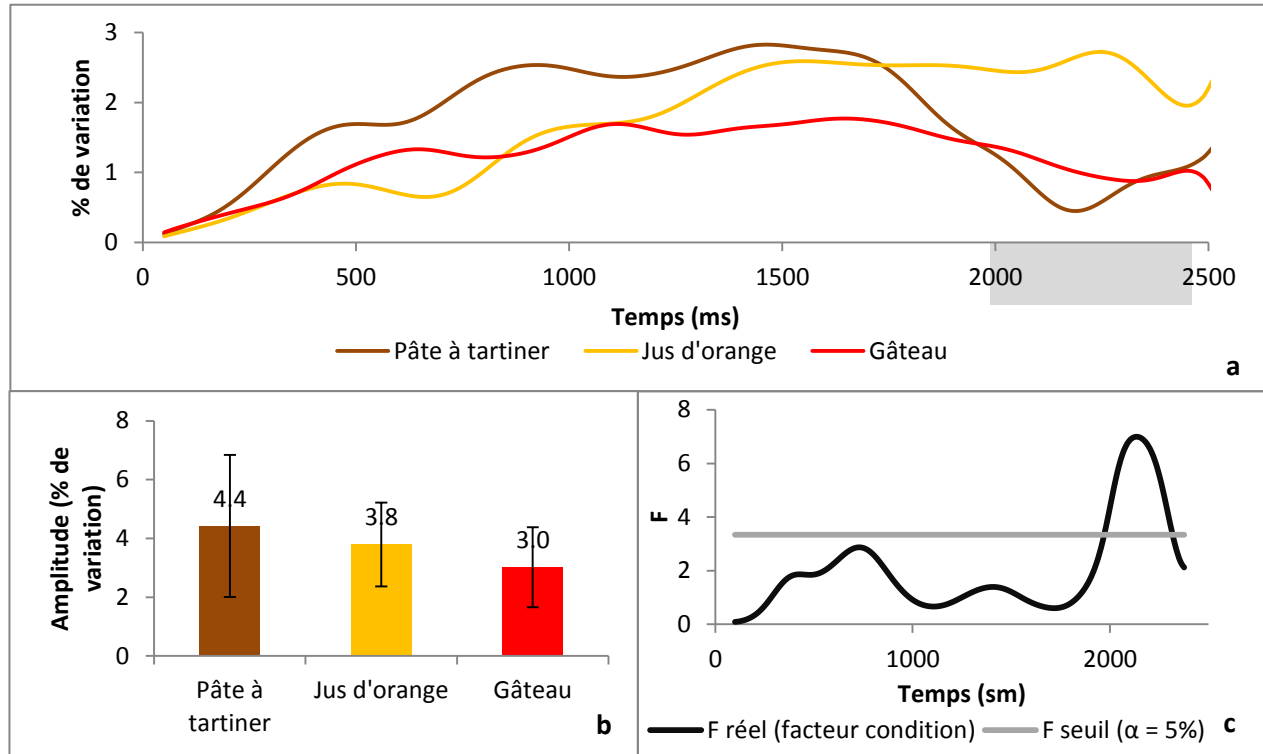


Figure 69. Comparaison des trois types de produits

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur produit en fonction du temps*

Réponses pupillaires durant l'écoute des musiques

La Figure 70 rapporte les résultats des comparaisons de chaque type de musique aux variations naturelles de la pupille et des deux types de musique entre eux.

De la même manière que pour les produits, on a tout d'abord **comparé chaque type de musique** au silence, à savoir, **aux variations naturelles de la pupille**. Pour chacun des deux types de musique, la réponse pupillaire semble bien supérieure aux variations naturelles de la pupille (Figure 70 (a)). En effet, les résultats des comparaisons temps par temps sur moyennes mobiles montrent une réponse pupillaire pendant l'écoute de musique appréciée significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille pendant toute la période étudiée (de 100ms à 2500ms) et également une réponse pupillaire durant l'écoute de musique non appréciée significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille de 611ms à la fin (2500ms) (Figure 70 (c)). Ces résultats ont été renforcés par les résultats des ACP dont la première et seule composante (91,63% et 93,47% de la variance totale, respectivement pour la musique appréciée et non appréciée) corrélée à la réponse moyenne [musique appréciée: $R = 0,99$, $p < .001$; musique non appréciée: $R = 9,99E-01$, $p < 0,001$] a été soumise à une analyse de la variance avec

sujet et condition comme facteurs. Les résultats révèlent un effet condition [musique appréciée: $F(1, 34) = 49,11$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,46$; musique non appréciée: $F(1, 34) = 51,28$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,42$].

Ensuite nous avons comparé les deux types de musique entre eux. D'après l'observation de l'évolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base les deux types de musique semblent entraîner une dilatation pupillaire similaire (Figure 70 (a)). Effectivement, le pic de dilatation a été calculé pour chaque type de produit et chaque sujet pour être soumis à une analyse de variance avec sujet et type de musique comme facteurs. Les résultats révèlent des pics de dilatation équivalents pour les deux types de musique [$F(1, 34) = 0,99$, $p = 0,327$] (Figure 70 (b)). La comparaison temps par temps sur moyennes mobiles a confirmé cette première observation, les résultats ne mettant en évidence aucune différence significative entre les deux types de musique (Figure 70 (c)).

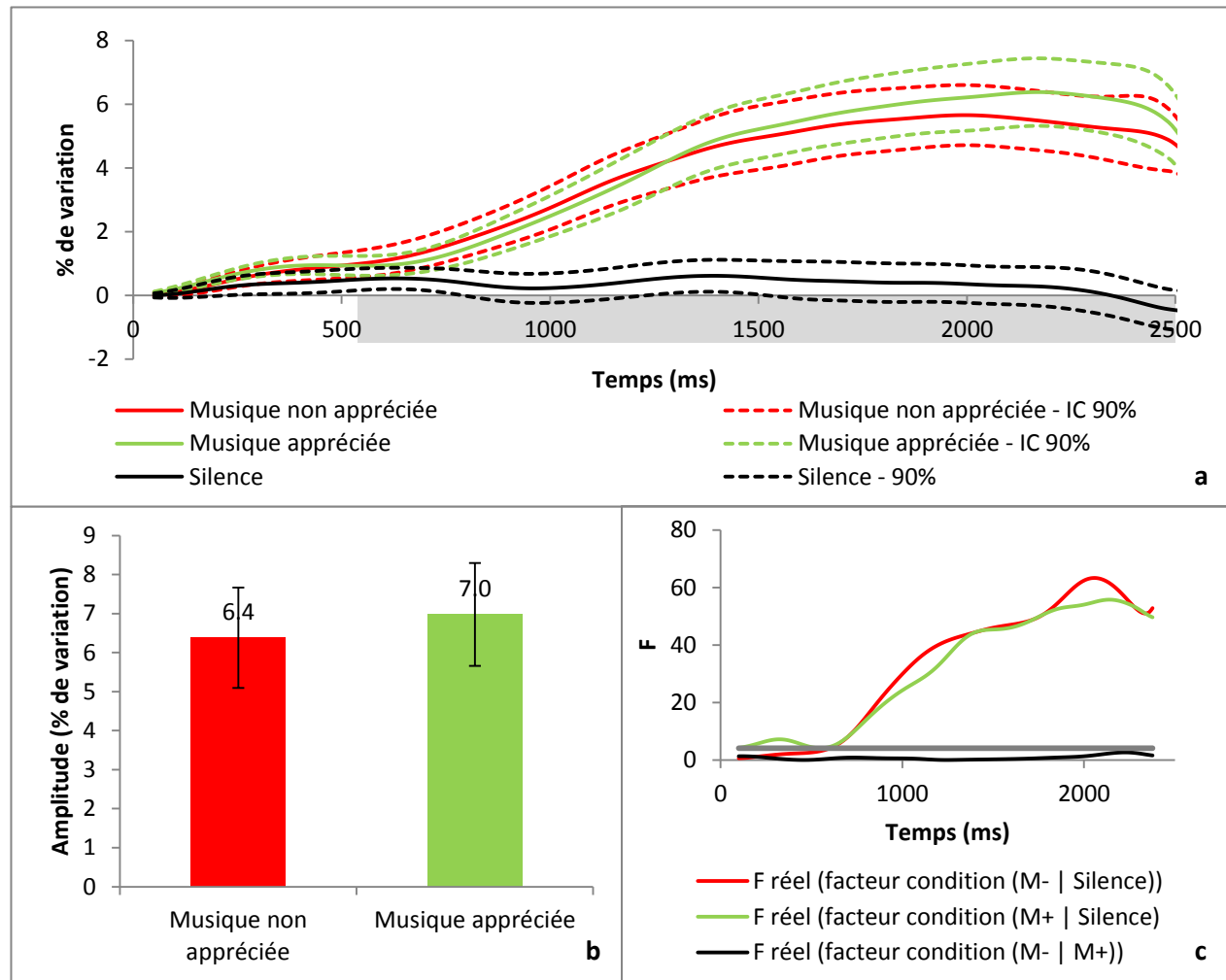


Figure 70. Comparaison de chaque type de musique aux variations naturelles de la pupille et entre eux

(a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base* (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)

(b) *Pics de dilatation* (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

(c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur condition en fonction du temps* (M- : musique appréciée, M+ : musique non appréciée)

Comparaison des réponses pupillaires aux produits et aux musiques

La Figure 71 rapporte les résultats de la **comparaison des réponses pupillaires moyennes consécutives à la dégustation des produits et durant l'écoute de musiques**.

D'après l'observation de l'évolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base, les deux types de stimulation semblent entraîner des réponses pupillaires différentes ; l'écoute de musique entraînerait une plus forte dilatation (Figure 71 (a)). En effet, le pic de dilatation moyen a été calculé pour chaque condition (produit ou musique) et chaque sujet pour être soumis à une analyse de variance à 2 facteurs, sujet et condition. Les résultats révèlent un effet condition [$F(1, 28) = 20,36$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,25$], le pic de dilatation était plus important pour la musique que pour le produit (Figure 71 (b)). Les résultats de la comparaison temps par temps sur moyennes mobiles confirment ce résultat en mettant en évidence une différence de 1040,5ms à 2500ms (fin) (Figure 71 (c)). Enfin, ce résultat a été renforcé par les résultats de l'ACP. La première et seule composante retenue lors de l'analyse (92,68% de la variance totale), corrélée à la réponse pupillaire moyenne ($R > 9,99E-01$, $p < 0,001$) a été soumise à une analyse de la variance avec sujet et condition comme facteurs. Les résultats révèlent un effet condition [$F(1,28) = 24,48$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,31$].

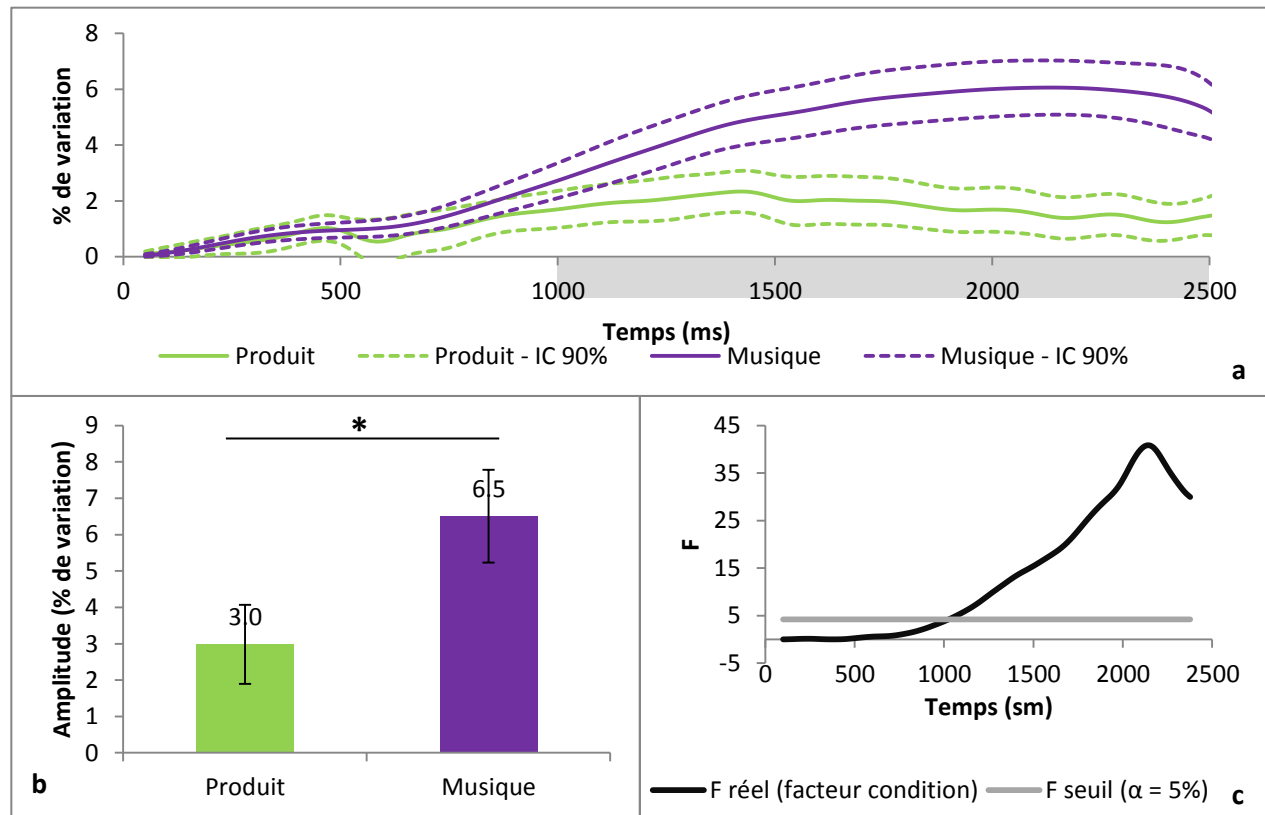


Figure 71. Comparaison des réponses pupillaires consécutives au produit et durant l'écoute de musique

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; * : différence significative avec $\alpha = 5\%$)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur type de stimulus en fonction du temps*

Comparaison des réponses pupillaires dues aux produits dans les différentes conditions

Enfin, les réponses pupillaires moyennes par condition ont été comparées entre elles. La Figure 72 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir de 18 sujets retenus. L'objectif est de vérifier notre hypothèse n°2 : « Les émotions provoquées par le produit et la musique s'additionnent lors d'une présentation simultanée et cela est traduit par une réponse pupillaire plus importante ».

La Figure 72(a) rapportant le **pourcentage de variation** moyen en fonction du temps pour chaque condition semble indiquer que la réponse pupillaire aux produits est « freinée » dans la condition musique non appréciée. Cependant, le **pic de dilatation** moyen a été calculé pour chaque condition pour être soumis à une analyse de variance avec sujet et condition comme facteurs et les résultats révèlent des pics de dilatation équivalents pour les trois conditions [$F(2, 34) = 0,93$, $p = 0,402$] (Figure 72 (b)). Ces résultats sont renforcés par la **comparaison temps par temps** qui ne met en évidence aucune différence (Figure 72 (c)).

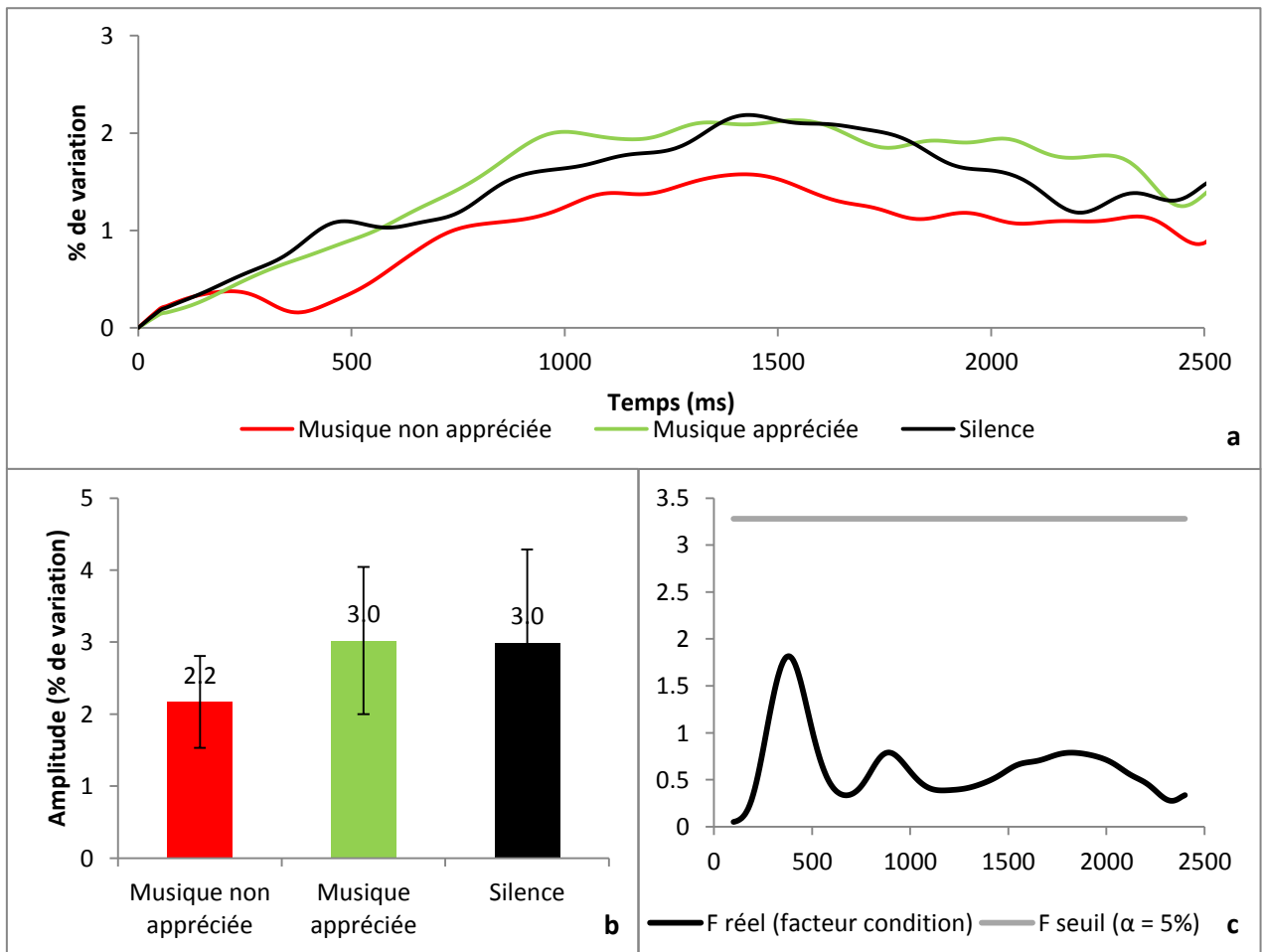


Figure 72. Comparaison des trois conditions (tous produits moyennés)

(a) Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base

(b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

(c) Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur condition de musique en fonction du temps

		Pic de dilatation	Comparaison temps par temps	ACP	
Produits	Marque nationale vs MDD	<div><div>G</div><div>J</div><div>G</div></div>	NS	NS	--
	Pâte vs silence	--	248,5ms-1601,5ms 2311ms-fin P > Silence	P > Silence p=0,005	
	Jus d'orange vs silence	--	925ms-1816ms 2195,5ms- fin J > Silence	J > Silence p=0,022	
	Gâteau vs silence	--	661ms- fin G > Silence	G > Silence p=0,013	
	Pâte vs jus vs gâteau	NS	1981ms-2311ms J > P, G	J > P, G p=0,006	
	Silence vs musique appréciée vs musique non appréciée	NS	NS	--	
	Musique	Musique appréciée vs silence	--	100ms - fin M+ > Silence	M+ > Silence p<0,001
Musique non appréciée vs silence		--	611ms - fin M- > Silence	M- > Silence p<0,001	
Musique appréciée vs Musique non appréciée		NS	NS	--	
Produits vs Musique		Musique > Produits p<0,001	1040,5ms- fin Musique > Produits	Musique > Produits p<0,001	

P	Pâte à tartiner
G	Gâteau
J	Jus d'orange
M+	Musique appréciée
M-	Musique non appréciée
M0	Silence

3.3.3. Questionnaire d'émotions

A chaque séance, les sujets devaient remplir un questionnaire sur leur état émotionnel avant de commencer le test. Celui-ci constituait le « blanc ». Ensuite, ils répondaient au questionnaire après chaque combinaison musique/produit. Pour avoir la notation des émotions de chaque combinaison musique/produit, les notes du blanc de la séance correspondante ont été retranchées. Ainsi, ce score corrigé permet de connaître l'état émotionnel du sujet relatif à son état émotionnel initial.

Analyse en composantes principales- représentation graphique multivariée de l'espace émotionnel

On a dans un premier temps réalisé une **Analyse en Composantes Principales** non normée avec comme observations, les questionnaires (un sujet * une condition) et comme variables, les items d'émotion.

Comme illustré dans la Figure 73 (a), la **représentation des items d'émotion projetés sur les deux premières dimensions** (60,77% de l'information) illustre des corrélations significatives ($p < 0,001$) entre les émotions «positives» et la première dimension [excitation: $R = 0,77$, joie: $R = 0,83$, et attirance: $R = 0,78$] et des corrélations significatives ($p < 0,001$) entre la «surprise» et les deux premières dimensions [Dim1: $R = 0,63$, Dim2: $R = 0,58$]. Egalement, on remarque de bonnes corrélations entre les émotions «négatives» et la seconde dimension [tristesse : $R = 0,61$, dégoût : $R = 0,63$, et colère : $R = 0,73$]. Cette représentation rappelle le modèle bi-dimensionnel ou modèle circomplexe de Russel (1980) qui représente les émotions comme étant distribuées sur un cercle avec pour dimension horizontale le plaisir (*pleasure*) et verticale l'état d'excitation (*arousal*).

Nous avons ensuite observé la **projection des variables illustratives sur le premier plan factoriel** (Figure 73(b)). Cette projection montre que les conditions « musique appréciée » et « musique non appréciée » ont respectivement des coordonnées positives et négatives sur la première dimension. De plus la condition « musique non appréciée » a également des coordonnées positives sur la seconde composante. Enfin, la condition « silence » a des coordonnées négatives sur les deux dimensions mais plus faiblement. On peut ainsi dire que la musique appréciée active la joie, l'excitation et l'attirance, des émotions donc « positives » tandis que la musique non appréciée active le dégoût, la colère, la tristesse et un peu la peur, des émotions donc « négatives » et diminue le ressenti des émotions positives. Pour les produits, les coordonnées sont positives sur la première dimension pour la pâte à tartiner de marque nationale (Nutella), légèrement négatives pour la variante MDD du gâteau et la variante marque national pour le jus d'orange et proches de 0 pour les autres variantes de gâteau et jus d'orange ; les coordonnées sur la seconde dimension sont proches de 0. Ainsi, il semblerait que la pâte à tartiner Nutella) entraîne plus d'émotions positives que les autres produits. Cependant ces coordonnées sont plus faibles et nous permettent surtout de conclure que la musique est beaucoup plus émotionnelle que les produits. L'observation du plan factoriel (1,3) n'apporte pas d'information supplémentaire. En effet, seule l'excitation est positivement corrélée à la 3^{ème} dimension mais aucun produit ni aucune condition (musiques ou silence) ne montre des coordonnées marquées sur cette dimension.

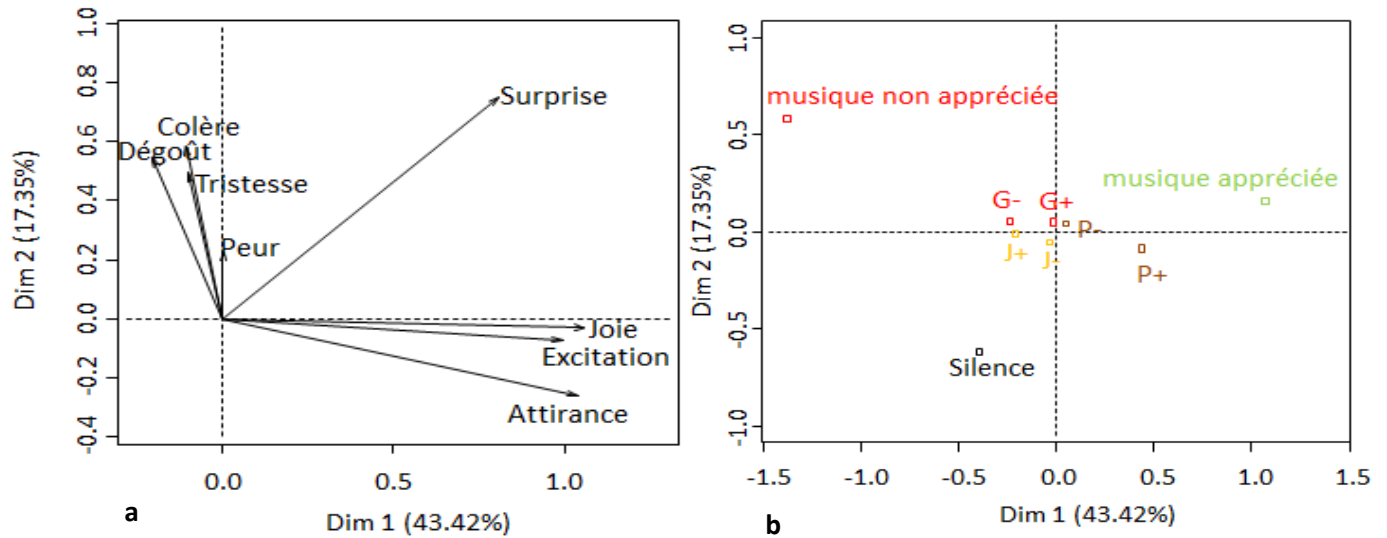


Figure 73. Résultats graphiques de l'ACP (G : Gâteau, P : Pâte à tartiner, J : Jus d'orange ; - : MDD, + : marque nationale)

(a) représentation des items d'émotion projetés sur les deux premières dimensions

(b) projection des variables illustratives sur le premier plan factoriel

Analyses de la variance

On réalise ensuite, des analyses de variance à 4 facteurs (sujet, musique, type de produit, marque) avec interactions (musique*type de produit, musique*marque et type de produit*marque) pour chaque item d'émotion. Lorsque cela était approprié, des tests de comparaison multiple de Tukey ont été utilisés afin de déterminer entre quelles conditions il existe des différences significatives. Le Tableau 40 rapporte les résultats.

Tableau 40. Résultats des analyses de variance pour chaque item d'émotion

	Attirance	Colère	Dégoût	Excitation	Joie	Peur	Surprise	Tristesse
Sujet	*	*	*	*	*	*	*	*
Musique	M+>M0>M-	M->M+>M0	M->M+,M0	M+>M0>M-	M+>M0>M-	M+,M->M0	M+>M->M0	M+,M->M0
Type de produit	P>G,J	NS	NS	P > J	NS	NS	NS	NS
Marque	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Musique*								
Type de produit	NS	NS	NS	P > J en silence	NS	NS	NS	NS
Musique*								
Marque	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Type de produit*	Marque>MDD							
Marque	uniquement pour P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

* : significatif au seuil de 5% / NS : Non Significatif

M+ : musique appréciée / M- : Musique non appréciée / M0 : Silence / P : pâte à tartiner / J : Jus d'orange / G : Gâteau

Pour interpréter ces résultats, on représente pour chaque produit et chaque musique, les scores corrigés pour chaque item d'émotion. Cela permet dans un premier temps d'identifier quel(les) produit(s)/musique(s) entraîne(nt) une augmentation ou diminution du ressenti de chaque émotion par rapport à l'état initial. Puis, mis en regard avec l'analyse de la variance, cela permet d'identifier les différences existantes entre les produits et les musiques.

Résultats émotionnels pour les produits

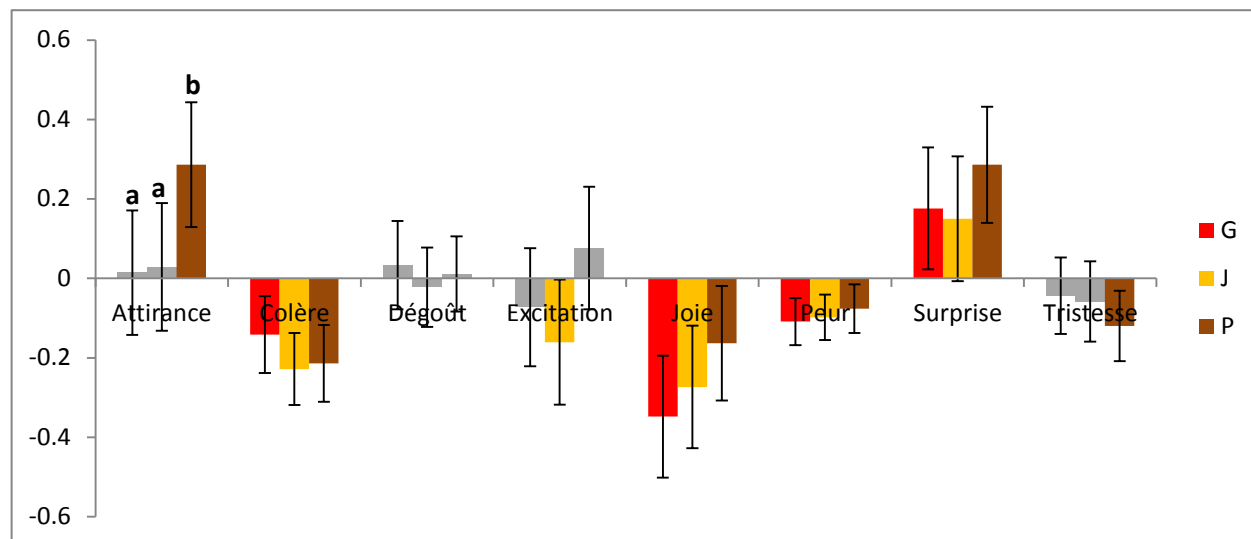


Figure 74. Score corrigé pour chaque item d'émotion pour chacun des types de produit (G : Gâteau, J : Jus d'orange, P : Pâte à tartiner) (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les barres grisées signifient que le score n'est pas significativement différent de 0 ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre produits - par item, 2 produits ayant une lettre différente entraînent un ressenti différent de l'émotion en question)

La Figure 74 rapporte les scores corrigés de chaque item d'émotion pour chaque type produit (les marques ont été moyennées pour une meilleure visibilité). Pour chaque item d'émotion, les types de produit n'entraînant ni augmentation ni diminution du ressenti de l'émotion par rapport à l'état émotionnel de départ (non significativement différent de 0) ont été grisés. On remarque sur ce graphique que : (1) La pâte à tartiner augmente l'attirance, (2) l'ensemble des produits diminue la colère, la peur et de manière plus étonnante, la joie et augmente la surprise, (3) l'excitation et la tristesse sont respectivement diminuées par le jus d'orange et la pâte à tartiner et (4) le dégoût n'est impacté par aucun des produits.

Si on regarde les résultats des ANOVA, on constate finalement que seule l'émotion « attirance » a été impactée par le facteur type de produit [$F(2,769)=6,29$, $p=0,002$, $\eta^2 = 0,009$]. Les tests de comparaison multiple ont montré que l'attirance était plus forte pour la pâte à tartiner que pour le jus d'orange et le gâteau. Egalement l'interaction type de produit*marque est significative pour l'attirance [$F(2,769)=3,86$, $p=0,022$, $\eta^2 = 0,005$] ; l'effet de marque est fonction du type de produit, les scores étaient plus élevés pour la marque nationale pour la pâte à tartiner, alors que les scores étaient équivalents pour les deux marques de jus d'orange et gâteau.

Résultats émotionnels de la musique

La Figure 75 rapporte les scores corrigés de chaque item d'émotion pour chaque condition de musique. On constate dans un premier temps que les musiques impactent plus l'état émotionnel que le produit. On remarque que : (1) la musique appréciée entraîne une augmentation de l'attirance, de l'excitation, de la joie donc des 3 émotions « positives », de la surprise et légèrement de la tristesse, (2) de manière plus modérée mais toujours significative la musique appréciée diminue la colère et le dégoût, (3) la musique non appréciée entraîne une augmentation de la colère et du dégoût et une diminution des 3 émotions « positives » (attirance, excitation et joie) et (4) le silence entraîne une diminution de la colère, du dégoût, de la joie, de la peur, de la surprise et enfin de la tristesse.

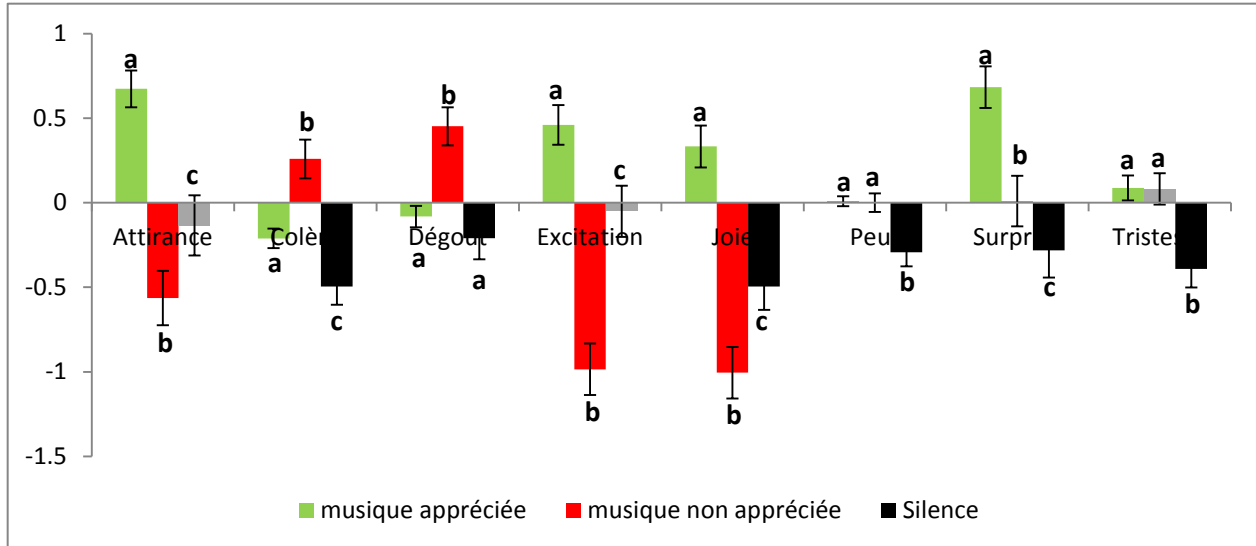


Figure 75. Score corrigé pour chaque item d'émotion pour chacune des conditions musique

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les barres grisées signifient que le score n'est pas significativement différent de 0 ; les lettres permettent de mettre en évidence les

Si on regarde les résultats des ANOVA, on remarque que toutes les émotions ont été impactées par la condition de musique [attirance: $F(2, 769) = 98,85$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,14$; colère: $F(2, 769) = 72,32$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,11$; dégoût: $F(2, 751) = 53,05$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,09$; excitation : $F(2, 766) = 103,02$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,18$; joie: $F(2, 767) = 135,97$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,19$; peur: $F(2, 769) = 47,36$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,08$; surprise: $F(2, 760) = 73,85$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,12$; tristesse: $F(2, 769) = 44,14$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,08$]. Les différences observées sont reportées sur la Figure 75 et viennent compléter les précédentes observations. Globalement les musiques appréciées et non appréciées entraînent des évolutions contraires pour l'attirance, l'excitation et la joie ainsi que pour la colère, le dégoût.

Interaction émotionnelle entre les produits et la musique

Nous avons constaté une interaction entre la musique et le type de produit pour l'excitation [$F(4, 766) = 2,75$, $p = 0,027$, $\eta^2 = 0,009$], la pâte à tartiner avait des scores plus élevés que le jus d'orange uniquement en condition silence. En musique, la différence entre produits disparaît.

3.3.4. Liens entre les données pupillaires et les données déclaratives

Réponses pupillaires et données hédoniques

Les réponses pupillaires pour les trois types de produits étaient équivalentes alors qu'en termes hédonique, la pâte à tartiner a reçu un meilleur score que le jus d'orange. De plus, les réponses pupillaires étaient équivalentes pour les deux types de musique, musique appréciée, musique non appréciée. Ces résultats suggèrent que la réponse pupillaire n'est pas impactée par la valence hédonique.

Réponses pupillaires et données émotions

Les réponses pupillaires ainsi que les résultats du questionnaire d'émotions suggèrent tous les deux que l'écoute de la musique impacte l'état émotionnel du sujet. Pour la pupille, cela se manifeste par une dilatation, le diamètre pupillaire augmente aussi bien pour la musique appréciée que pour la musique non appréciée. Pour les scores d'émotion, cela se manifeste :

- pour la musique appréciée, par une augmentation de l'attirance, de l'excitation, de la joie, de la surprise et légèrement de la tristesse et une diminution de la colère et du dégoût
- et pour la musique non appréciée, par une augmentation de la colère et du dégoût et une diminution des 3 émotions « positives ».

Les réponses pupillaires ainsi que les résultats du questionnaire d'émotions suggèrent également tous les deux que la dégustation de produits impacte l'état émotionnel du sujet mais plus modérément. En effet, la dilatation pupillaire est plus faible, elle n'est peut-être même due qu'à la stimulation. Egalement, les scores émotionnels sont plus faibles mais permettent tout de même de montrer que la pâte à tartiner augmente l'attirance, que l'ensemble des produits diminue la colère, la peur et de manière plus étonnante, la joie et augmente la surprise et que le jus d'orange et la pâte à tartiner diminuent l'excitation et la tristesse.

Toutefois, alors que les scores émotionnels (questionnaire émotionnel) permettent de discriminer émotionnellement les produits sur l'attirance et les musiques sur toutes les émotions, le diamètre pupillaire ne le permet pas. Cela peut s'expliquer par le fait qu'en réponse pupillaire on va uniquement mesurer la charge émotionnelle globale alors qu'en questionnaire on peut mesurer l'augmentation mais aussi la diminution de chaque émotion définie, ce qui permet de mieux discriminer les produits et/ou musiques. De plus, en questionnaire on mesure plusieurs items d'émotions alors qu'en réponse pupillaire on est sur une réponse globale. Très probablement qu'en questionnaire si on travaillait sur une note d'émotion moyenne, on ne mettrait pas en évidence autant de différence. Et effectivement l'analyse de la variance à 4 facteurs (sujet, condition, type de produit et marque) avec interaction (type de produit*marque) sur le score émotionnel moyen ne met en évidence aucune différence entre type de produit ou marque. En revanche, une différence entre musique appréciée et musique non appréciée persiste, la musique appréciée donne un score émotionnel plus fort que la musique non appréciée. Cela s'explique par le fait que la condition musique non appréciée diminue le score de certains items d'émotions par rapport à l'état émotionnel initial du sujet plus qu'elle en augmente.

3.3.5. Impact de la musique sur la notation hédonique

Pour finir, nous souhaitons vérifier notre dernière hypothèse, l'hypothèse n°3 : « *L'émotion provoquée par la musique a un impact sur l'appréciation hédonique des produits* ». Les notes d'appréciation ont été récupérées pour chaque produit, chaque sujet et chaque condition (silence, musique appréciée, musique non appréciée). Ces notes ont ensuite été soumises à une ANOVA avec sujet, type de produit, variante et condition (silence, musique appréciée ou musique non appréciée) comme facteurs et avec interactions (type de produit * condition, marque * condition et type de produit * marque * condition). On retrouve alors l'effet type de produit mentionné au paragraphe 3.3.1. Appréciation des produits [$F(2,753)=10,03$, $p<0,001$, $\eta^2=0,014$]. En revanche, l'ajout du facteur condition fait apparaître un effet marque que nous n'avons pas pour les notes en condition silence [$F(1, 753)=24,8$, $p<0,001$, $\eta^2 = 0,018$] (seule une tendance avait été observée), les marques nationales sont plus appréciées que les marques de distributeur. Cependant, la significativité de l'interaction type de produit * marque [$F(2,753)=8,47$, $p<0,001$, $\eta^2 = 0,012$] montre que cet effet marque est porté par la pâte à tartiner comme nous l'avons déjà précédemment remarqué. Enfin, les résultats révèlent un effet condition [$F(2, 753)=3,89$, $p= 0,021$, $\eta^2 = 0,006$], les produits sont hédoniquement surévalués en condition musique appréciée par rapport aux conditions silence et musique non appréciée (Figure 76). Les interaction type de produit * condition, marque * condition et type de produit * marque * condition ne sont pas significatives [respectivement, $F(4, 753)=0,95$, $p=0,435$, $F(2, 753)=0,93$, $p=0,396$, $F(4, 753)=0,68$, $p=0,605$].

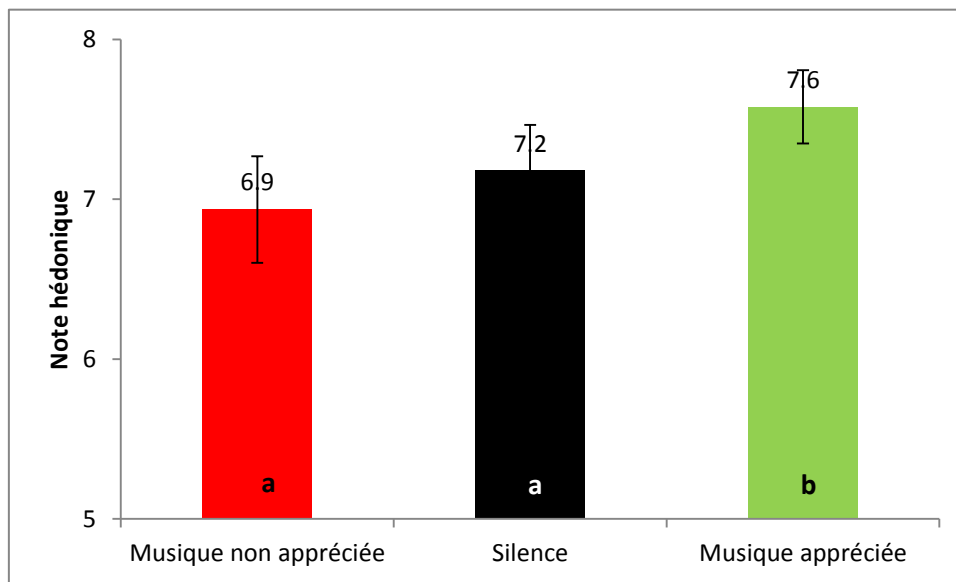


Figure 76. Notation hédonique moyenne des produits dans chaque condition

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre produits – 2 produits ayant une lettre différente ont une note hédonique différente)

3.4. Conclusion

Hypothèse n°1 : « Il existe une réponse pupillaire durant l'écoute de musique et consécutive à la dégustation de produits traduisant la présence d'émotion mais non liée à la valence mais à l'intensité »

Hypothèse n°2 : « Les émotions provoquées par le produit et la musique s'additionnent lors d'une présentation simultanée et cela est traduit par une réponse pupillaire plus importante »

On retrouve pour cette expérimentation, une dilatation pupillaire consécutive à l'ingestion de produits. Cette dilatation pupillaire est équivalente pour les 2 variantes (marque nationale et MDD) des 3 types de produits testés (pâte à tartiner, gâteau et jus d'orange) et équivalente pour les 3 types de produits, mais significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille. Cependant, nous n'observons des dilatations que de 3 à 4,4%, or nous avons rapporté dans le chapitre 4 que l'eau faisait elle-même dilater la pupille de 3,8%. Il semblerait donc ici que les dilatations observées soient le résultat de la stimulation et non de la présence d'émotions, y compris pour la pâte à tartiner qui semblait avoir un plus fort pouvoir émotionnel lors de la première expérimentation (dilatation de 6,4% contre 4,4% cette fois). **Aussi, nous montrons à nouveau que les produits n'auraient pas un pouvoir émotionnel suffisamment fort pour être mesuré au travers de la pupille.** De plus cette dilatation pupillaire ne serait pas impactée par la musique ; **la présence de musique n'augmente pas la charge émotionnelle des produits.**

De même, on observe une dilatation pupillaire durant l'écoute de musiques. Cette dilatation est équivalente quelle que soit la valence hédonique de la musique mais est significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille et surtout, à la dilatation moyenne observée pour les produits (pic de variation moyen pour les produits : 3% ; pic de variation moyen pour les musiques : 6,5%). **Il semblerait donc que les musiques aient un pouvoir émotionnel plus grand que les produits eux-mêmes.** Cela va dans le sens d'une **forte influence contextuelle sur les émotions.**

Cependant, bien que la réponse pupillaire semble indiquer la présence d'émotions, elle ne les qualifie pas, **nous soulignons là, l'importance de recueillir des informations déclaratives pour qualifier les émotions.**

Hypothèse n°3 : « L'émotion provoquée par la musique a un impact sur l'appréciation hédonique des produits »

Enfin, une **surévaluation des produits lors de l'écoute de musique appréciée** renforce l'idée d'un **fort pouvoir émotionnel de la musique** déjà traduit par la dilatation pupillaire et celle d'une **forte influence des émotions sur l'appréciation hédonique.** Aussi, **l'observation d'une dilatation pupillaire lors d'une « mise en contexte » pourrait prédire un éventuel impact sur l'appréciation des produits.**

4. Conclusion générale du chapitre

Le Tableau 41 récapitule l'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre. Tous ces résultats ne sont pas comparables en raison de l'artéfact de la lumière sur certaines données, les valeurs grisées sont celles ayant subies l'artéfact. Sans prendre en compte ces données, nous observons une dilatation moyenne pour des stimuli gustatifs de 4,6% et de 8,7% pour des stimuli auditifs. En rappelant que nous avons observé dans le chapitre 4, une dilatation moyenne pour l'eau de 3,8%, on peut penser que bien que faible, la dilatation pupillaire aux produits semble en moyenne suggérer de l'émotion. Surtout, il semblerait que les stimuli auditifs soient plus émotionnels que les stimuli gustatifs. Cela va dans le sens d'un pouvoir émotionnel fort du contexte.

Tableau 41. Récapitulatif des principaux résultats des 3 expériences présentées dans ce chapitre

	Type de stimuli	Stimulus	Différent du silence ?	Différent entre eux			Pic de variation (%) Moyenne	
Expérience 1	Gustatifs	Sirop1	--	Non	Pate > Compote	--	9,1	12,5
		Sirop2	--				15,1	
		Sirop3	--				13,3	
		Compote1	--	Non			3,3	
		Compote2	--				3,4	
		Compote3	--				4,6	
		Pate1	--	Non			6,7	
		Pate2	--				7,5	
Expérience 2	Gustatifs	Bière	--	Non	Non comparable (artéfact lumière pour les produits)	--	9,0	7,7
		Mojito	--				6,9	
		Pastis	--				8,0	
		Whisky	--				7,0	
	Auditifs	Ambiance irlandaise	--	Principalement : Douche > autres ambiances			7,9	9,2
		Ambiance latino	--				9,0	
		Ambiance provençale	--				7,2	
		Ambiance lounge	--				8,0	
		Ambiance douche	--				14,0	
		Ambiance usine	--				9,2	
		Ambiance bureau	--				10,9	
		Ambiance voiture	--				7,0	
Expérience 3	Gustatifs	Gateau1	Oui	Non	Non	Musique > Produits	3,0	3,7
		Gateau2	Oui					
		Jus1	Oui	Non			3,8	
		Jus2	Oui					
		Pate1	Oui	Non			4,4	
		Pate2	Oui					
	Auditifs	Musique appréciée	Oui	Non			7,0	6,9
		Musique non appréciée	Oui				6,4	

CHAPITRE 6 : ÉTUDE DE LA RÉACTION PUPILLAIRE À DES STIMULI OLFACTIFS

1. Objectifs

Cette étude avait pour objectif :

- d'évaluer le **pouvoir émotionnel d'odeurs** de boissons alcoolisées par la mesure de la réponse pupillaire consécutive aux stimulations olfactives
- d'évaluer le **pouvoir émotionnel d'ambiances** soit congruentes, soit non congruentes avec les odeurs par la mesure de la réponse pupillaire durant leur écoute
- d'évaluer le **pouvoir émotionnel des odeurs lors de la diffusion d'ambiances** congruentes ou non congruentes par la comparaison des réponses pupillaires consécutives aux stimulations olfactives en silence et lors des 2 conditions d'ambiance
- d'étudier le **lien entre des données hédoniques et émotionnelles issues de questionnaires et les réponses pupillaires**
- d'étudier l'**impact d'une amorce contextuelle** (les ambiances) congruente ou non congruente **sur l'appréciation hédonique** des odeurs **et le temps de réponse** à la question « Avez-vous aimé cette odeur ? »

Nos hypothèses étaient les suivantes :

Hypothèse n°1 : « Il existe une réponse pupillaire durant l'écoute d'ambiances et consécutive aux stimulations olfactives traduisant la présence d'émotions, non liée à la valence mais à l'intensité »

Hypothèse n°2 : « La réponse pupillaire consécutive aux stimuli olfactifs est supérieure à celle consécutive aux stimuli gustatifs »

Hypothèse n°3 : « Les émotions provoquées par l'odeur et l'ambiance s'additionnent lors d'une présentation simultanée et cela se traduit par une réponse pupillaire plus importante »

Hypothèse n°4 : « Le contexte a un impact sur l'appréciation hédonique des stimuli olfactifs et le temps de réponse à la question « Avez-vous aimé cette odeur ? » ; l'appréciation hédonique augmente avec la congruence pendant que le temps de réponse diminue »

2. Méthodes

2.1. Participants

44 sujets (14 hommes et 30 femmes) ont été recrutés pour cette étude par un prestataire avec pour âge moyen 44,57 ans (erreur standard = 1,59) (cf annexe n°5 pour le questionnaire de recrutement). Les participants avaient une vue normale ou corrigée à la vision normale et étaient au moins consommateurs occasionnels (au moins une fois par an) de boissons alcoolisées. Pour les remercier de leur participation, ils recevaient une indemnité de 10€ par séance.

2.2. Appareil et installation

Le **matériel** utilisé était le suivant :

- Ecran Tobii d'eye tracking T60

- Ordinateur portable avec le logiciel Tobii Studio
- Flacons pour contenir les stimuli olfactifs + mouillettes de parfumeur
- Flacon d'eau pour y déposer les mouillettes afin d'éviter la diffusion d'odeur
- Ordinateur portable pour la diffusion des ambiances + casque audio
- Luxmètre

Les tests ont été réalisés dans une pièce privée de la lumière du jour. La **luminosité** moyenne mesurée était de 94 lux (erreur standard : 4) (mesure prise au niveau du front du sujet installé, écran allumé) et la **luminance** de l'écran de 30 cd/m².

2.3. Tâches et stimuli

Trois **principales tâches** étaient réalisées par le sujet, dans l'ordre, une tâche d'**écoute**, une tâche d'**olfaction** et une tâche d'**évaluation** (questionnaires). La tâche d'écoute consistait à écouter une ambiance, sa durée était de 5s, le sujet avait simplement comme consigne d'écouter. La tâche d'olfaction consistait à sentir une mouillette imprégnée du liquide odorant, sa durée était également de 5s ; la diffusion de l'ambiance se poursuivait lors de la tâche d'olfaction. La troisième et dernière tâche consistait à répondre à deux questionnaires, l'un hédonique, le sujet devait évaluer son appréciation de l'ambiance et de l'odeur et l'autre émotionnel, le sujet devait évaluer son état émotionnel au travers d'items d'émotions.

Trois odeurs de boissons alcoolisées étaient testées :

- Odeur mojito (Arôme Firmenich)
- Odeur pastis (Ricard)
- Odeur whisky (Chivas Regal)

Ces alcools sont connus de la majeure partie de la population et sont faciles à contextualiser. Les odeurs ont été présentées sur des mouillettes que l'expérimentateur trempait dans le flacon correspondant à chaque odeur pour chaque sujet. Dans le cas du whisky, le flacon contenait le produit pur. Pour l'odeur de Mojito, le flacon contenait un arôme (Firmenich). Pour le pastis, le flacon contenait une dilution de Ricard dans de l'eau (1,5 ml de Ricard pour 8,5 ml d'eau) afin que l'odeur corresponde à celle rencontrée lors de sa consommation. Les sujets devaient respirer le produit naturellement et non pas le sniffer.

Ensuite, il y avait **trois conditions ambiance**, « ambiance congruente », « ambiance non congruente » et « silence », cette dernière étant la situation contrôle. Trois des quatre ambiances de la précédente expérimentation (Chapitre 5 – Expérience 2) ont été réutilisées. Pour trois d'entre elles, elles ont été associées à l'odeur du produit auquel elles avaient été associées la première fois. En revanche, c'est l'ambiance irlandaise, plutôt que « lounge » qui, au vu des résultats du chapitre 5 (Tableau 35) a été associée à l'odeur du whisky. Le Tableau 42 indique les ambiances choisies, rappelle leur description et indique les associations ambiance/odeur.

Tableau 42. Description des ambiances et association ambiance/produit

Ambiance	Description	Association	
		Type	Odeur
Latino	Ambiance bar latino : musique latino, bruits de préparation de cocktails (shaker, glaçons), personnes qui discutent	Congruente	Mojito
Irlandaise	Ambiance pub irlandais : musique irlandaise, personnes qui discutent		Whisky
Provençale	Bruits de cigale, personnes qui jouent à la pétanque et qui trinquent		Pastis
Douche	Bruits de l'eau de la douche qui coule, bruits de radio, personne qui siffle (« l'm singing in the rain »)	Non congruente	Pastis
Bureau	Bruits de clavier, de téléphone et de fax, personnes qui parlent « travail »		Mojito
Voiture	Bruits de moteur, de circulation, de klaxons et de radio		Whisky

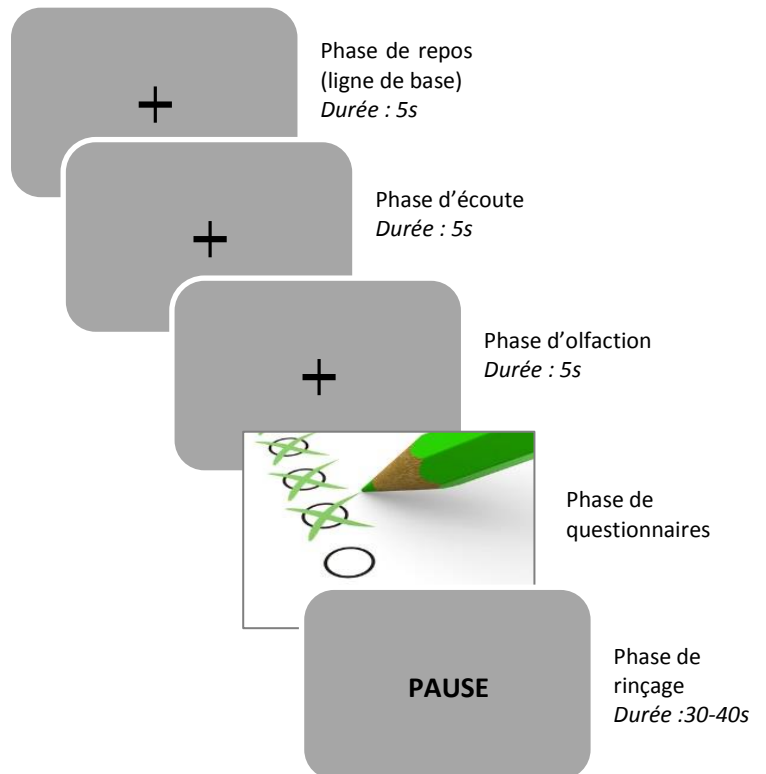
Enfin, le **questionnaire hédonique** permettait au sujet d'évaluer l'odeur et l'ambiance en attribuant une note de «Je n'aime pas du tout» (0) à "j'aime vraiment beaucoup" (10) pour chacune. Le **questionnaire émotionnel** avait pour objectif de permettre au sujet d'évaluer son propre état émotionnel, il lui était demandé « comment vous sentez-vous maintenant ? ». Pour cela, le questionnaire de l'expérience 3 du chapitre 5 a été réutilisé.

2.4. Procédure

Chaque séance correspondait à une condition d'ambiance, ambiance congruente, ambiance non congruente ou absence d'ambiance (silence). La présentation des différentes associations odeur/ambiance étaient équilibrées entre les sujets (cf Annexe N°1 pour le plan d'expérience).

La procédure de mesure se déroulait en 5 étapes (Figure 77) :

- une **phase de repos** de 5s pour la mesure de la ligne de base
- une **phase d'écoute** de 5s pour l'enregistrement de la réponse pupillaire durant l'écoute des ambiances
- une **phase d'olfaction** de 5s pour l'enregistrement de la réponse pupillaire consécutive à l'olfaction des odeurs pendant laquelle le sujet devait répondre à la


Figure 77. Procédure de l'expérimentation

question « aimez-vous cette odeur » en utilisant les touches « Ctrl » ou « Entrée » (Figure 78) (pour 50% des sujets la touche « Ctrl » correspondait à la réponse « oui » et la touche « Entrée » à la réponse « non » ; pour les autres sujets c'était l'inverse)

- une **phase de questionnaires** pour le recueil de l'appréciation de l'odeur et de l'ambiance et le recueil de l'état émotionnel du sujet
- et enfin une **phase de pause** de **40s** permettant également le repos des yeux



Figure 78. Touches du clavier utilisées par les sujets pour répondre à la question « Avez-vous aimé cette odeur ? »

Le test se déroulait en 4 étapes :

1. Installation du sujet et explication de la séance.

Le sujet était installé à environ 60 cm de l'écran. Afin de minimiser la sollicitation des yeux, des consignes identiques pour tous les sujets lui étaient lues :

Amorçage produit : « Vous allez participer à une séance visant à voir la réaction de vos yeux lorsque vous sentez différentes odeurs et écoutez différents sons. La séance va répéter dans l'ordre, phase de repos, phase d'écoute, phase d'olfaction et phase de rinçage. Avant et pendant chaque phase d'écoute et d'olfaction il sera important de garder les yeux sur l'écran. La phase d'écoute consistera simplement à écouter une ambiance qui sera diffusée dans ce casque. La phase d'olfaction consistera à sentir l'odeur qui vous sera présentée sur une mouillette, il vous sera alors demandé si oui ou non, vous aimez cette odeur. Pour répondre à cette question, vous devrez appuyer sur une des deux touches, « Ctrl » ou « Entrée » (Fig. 2). Enfin la phase de pause vous permettra de reposer vos yeux avant de passer à l'essai suivant. Seulement durant cette phase vous aurez la liberté de ne pas fixer l'écran. La pause vous sera indiquée à l'écran et durera environ 40s, je vous indiquerai le moment de l'essai suivant.

Avez-vous des questions ?

Nous allons maintenant commencer par la calibration de l'appareil puis nous réaliserons un essai avec de l'eau et nous passerons au test.»

2. Calibration de l'eye-tracker.
3. Essais à blanc.
4. Mesures.

Le test démarrait une fois la calibration effectuée, et les consignes comprises par le sujet.

Après avoir participé aux trois séances, les participants devaient remplir un questionnaire sur leur appréciation des produits associés aux odeurs testées, leur fréquence de consommation, l'évocation des

produits, leur appréciation des ambiances et la pertinence des associations odeur – ambiance (annexe n°3).

2.5. Analyse des données

2.5.1. Evaluation de la pertinence des associations odeur-ambiance

Dans un premier temps, avant de commencer l'exploitation des données, nous avons cherché à savoir si les associations que nous avons réalisées entre les odeurs et les ambiances étaient pertinentes. Lors du questionnaire final, les participants devaient noter sur une échelle de 0 à 4 la pertinence des associations entre les odeurs et chacune des ambiances congruentes et non congruentes. Les moyennes de chaque association ont été observées.

2.5.2. Appréciation des odeurs et des ambiances

Les notes d'appréciation données aux odeurs lors de la condition silence ont été récupérées pour chaque odeur et chaque sujet et soumises à une **analyse de la variance à 2 facteurs**, sujet et odeur. Des tests de **comparaison multiple de Tukey** ont été appliqués afin de déterminer les produits entre lesquels il existe des différences significatives. Egalement, les notes d'appréciation données aux ambiances ont été récupérées pour chaque ambiance et chaque sujet et soumises à une **analyse de la variance à 2 facteurs**, sujet et ambiance, qui a ensuite été complétée par des tests de **comparaison multiple de Tukey**. Les analyses statistiques ont été conduites en utilisant le logiciel statistique Statistica 10 (© StatSoft).

2.5.3. Réactions pupillaires

Les données ont tout d'abord été extraites comme rapporté dans le chapitre 3 (2.1. Extraction des données) de 1s avant stimulus pour permettre le calcul de la ligne de base à 2,5s après stimulus pour l'étude de la réaction spécifique au stimulus. Notons que contrairement à l'expérience 2 du chapitre précédent, pour les ambiances, à 2,5s la réaction était terminée, nous n'avons donc pas étendu la fenêtre.

Une nouvelle fois, tous **les enregistrements avec plus de 35% de valeurs manquantes ont été exclus des analyses** (25,0%) (cf Chapitre 4 – 2.5 Analyse de données pour le choix du seuil).

Ensuite, la réponse pupillaire consécutive à la **stimulation olfactive « eau »** (odeur contrôle) a été **comparée au silence et aux odeurs** afin de savoir si nous pouvions l'utiliser en tant que contrôle. Elle ne s'est pas avérée être un bon contrôle pour les odeurs car finalement, la surprise de n'avoir aucune odeur a provoqué une forte dilatation (équivalente à celle des odeurs et significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille). Nous avons donc choisi d'utiliser le silence (absence de stimulation) comme contrôle pour les odeurs afin de juger de la significativité de la dilatation. Ainsi, les réponses pupillaires consécutives à **chaque odeur** (dans le silence) ont été **comparées au silence** (variations

naturelles de la pupille). Puis ces mêmes réponses pupillaires ont été comparées **entre elles**. De la même manière, pour les ambiances, les réactions pupillaires à **chaque ambiance** ont été **comparées aux variations naturelles du diamètre pupillaire** puis **entre elles**. Enfin, les réponses pupillaires consécutives à chaque odeur ont été comparées entre conditions (ambiance congruente, ambiance non congruente, silence). Pour chaque comparaison on a pris garde à ce que les signaux comparés soient récupérés à partir des mêmes sujets. A savoir, lorsque les données d'un sujet étaient exclues sur une des odeurs/ambiances comparées alors ce sujet était exclu de l'analyse. Ceci permettait d'éliminer au maximum le bruit dû aux variations inter-individuelles.

Une **correction de la ligne de base** a été appliquée tel que définie dans le chapitre 3 (3. Traitement de données) pour chacune des odeurs et chacune des ambiances. Les données ont été exprimées en pourcentage de variation. Egalement, les différentes méthodes rapportées dans ce même chapitre, à savoir, le **tracé des courbes**, la **comparaison des pics de dilatation**, la **comparaison temps par temps** et l'**ACP** (lorsque elle était appropriée) ont été appliquées telles qu'elles ont été définies.

2.5.4. Questionnaire d'émotions

L'analyse du questionnaire d'émotions s'est réalisée en 2 étapes :

- **Analyse en Composantes Principales (ACP)** : L'ACP réalisée avait pour observations, les questionnaires (un sujet * une condition) et pour variables, les items d'émotion et avait pour objectif d'offrir une représentation graphique multivariée de l'espace émotionnel
- **Analyses de la variance** : Une analyse de la variance à 3 facteurs (sujet, ambiance, odeur) avec interaction (ambiance*odeur) a été réalisée pour chaque item d'émotion afin de déterminer si les odeurs et ambiances entraînaient des émotions différentes. Lorsque cela était approprié, des tests de comparaison multiple de Tukey ont été utilisés afin de déterminer entre quelles conditions il existait des différences significatives.

2.5.5. Liens entre la pupille, l'hédonisme et les émotions

Les différentes réponses pupillaires ont été observées en parallèle des données déclaratives hédoniques et émotionnelles.

2.5.6. Impact de la congruence sur la notation hédonique et le temps de réponse à la question « Aimez-vous cette odeur ? »

Les **notes d'appréciation** ont enfin été récupérées pour chaque odeur et chaque sujet dans chacune des 3 conditions afin d'être soumises par produit à une **analyse de la variance à 3 facteurs**, sujet, odeur et condition, avec interaction (odeur * condition). Les analyses statistiques ont été conduites en utilisant le logiciel statistique Statistica 10 (© StatSoft). La même analyse a été effectuée pour le **temps de réponse**.

3. Résultats

3.1. Evaluation de la pertinence des associations

Avant de commencer l'exploitation des données, nous avons cherché à savoir si les associations que nous avons réalisées entre les odeurs et les ambiances étaient pertinentes. Lors du questionnaire final, les participants devaient noter sur une échelle de 0 à 4 la pertinence des associations entre les odeurs et chacune des ambiances congruentes et non congruentes. Les moyennes de chaque association sont répertoriées dans le Tableau 43.

Tableau 43. Moyennes des notes de congruence pour les associations Odeur – Ambiance

	Latino	Provençale	Irlandaise	Bureau	Douche	Transport
Mojito	3,82	1,48	0,45	0,91	1,07	0,30
Pastis	1,36	3,84	0,55	1,20	1,05	0,45
Whisky	1,05	1,05	3,43	1,23	0,68	0,25

Légende - en vert : note de pertinence la plus haute / en rouge : note de pertinence la plus basse / fond gris : associations choisies

Les moyennes les plus élevées pour chaque odeur sont celles avec leur ambiance congruente respective. En revanche, les notes les plus basses sont avec l'ambiance transport et ceci pour les 3 odeurs. D'après nos participants, les associations non congruentes que nous aurions pu faire sont l'ambiance bureau et l'odeur mojito comme nous l'avons fait, l'ambiance transport et l'odeur du pastis et enfin l'ambiance douche avec l'odeur du whisky. Les associations que nous avons réalisées sont, cependant, sans contradiction avec les données du tableau ci-dessus.

3.2. Appréciation des odeurs et des ambiances

Les notes d'appréciation de la condition silence (notes « témoins ») ont été récupérées pour chaque odeur et chaque sujet. Ces notes ont ensuite été soumises à une ANOVA avec sujet et odeur comme facteurs. Les résultats révèlent un effet significatif pour le facteur odeur [$F(2,86) = 18,31$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,19$] (**Figure 79**). Les tests de comparaison multiple de Tukey appliqués afin de déterminer entre quelles odeurs il existe des différences significatives montrent que les sujets donnent un meilleur score aux odeurs de mojito ($M = 6,2$, erreur standard = 0,31) et pastis ($M = 6,4$, erreur standard = 0,35) qu'à l'odeur de whisky ($M = 4,0$, erreur standard = 0,38).

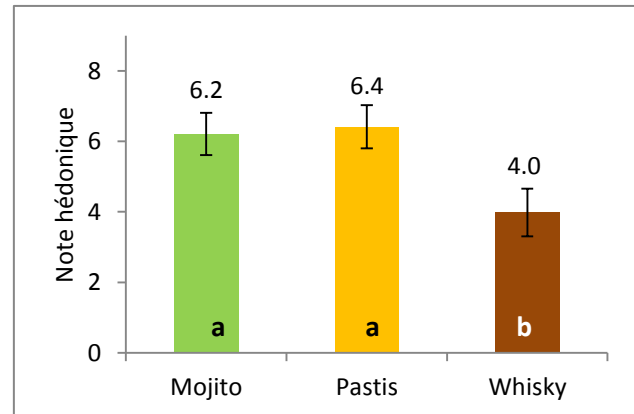


Figure 79. Notation hédonique moyenne attribuée aux odeurs

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre odeurs - 2 odeurs ayant une lettre différente ont une note d'appréciation différente)

Les notes d'appréciation des ambiances ont été récupérées pour chaque ambiance et chaque sujet. Ces notes ont ensuite été soumises à une ANOVA avec sujet, type d'ambiance et ambiance hiérarchisé dans type d'ambiance comme facteurs. Les résultats révèlent tout d'abord un effet significatif pour le facteur ambiance [$F(4,215) = 38,1$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,25$] ; les ambiances latino et provençale ont été préférées à l'ambiance irlandaise et l'ambiance douche a été préférée à l'ambiance bureau, elle-même préférée à l'ambiance voiture (Figure 80(a)). Egalement, les résultats révèlent un effet type d'ambiance [$F(1,215) = 175,3$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,28$] ; les ambiances congruentes ont été préférées aux ambiances non congruentes (Figure 80(b)).

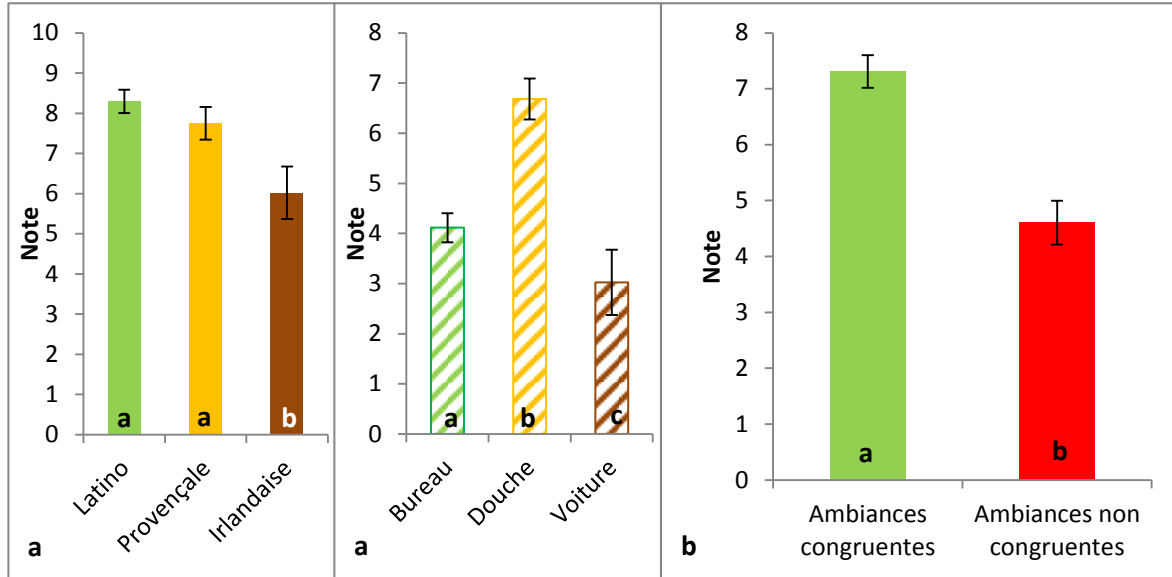


Figure 80. Notation hédonique moyenne des ambiances et types d'ambiance

(a) Données moyennées par ambiance

(b) Données moyennées par type d'ambiance

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre ambiances ou types d'ambiance - 2 ambiances ou types d'ambiance ayant une lettre différente ont une note d'appréciation différente)

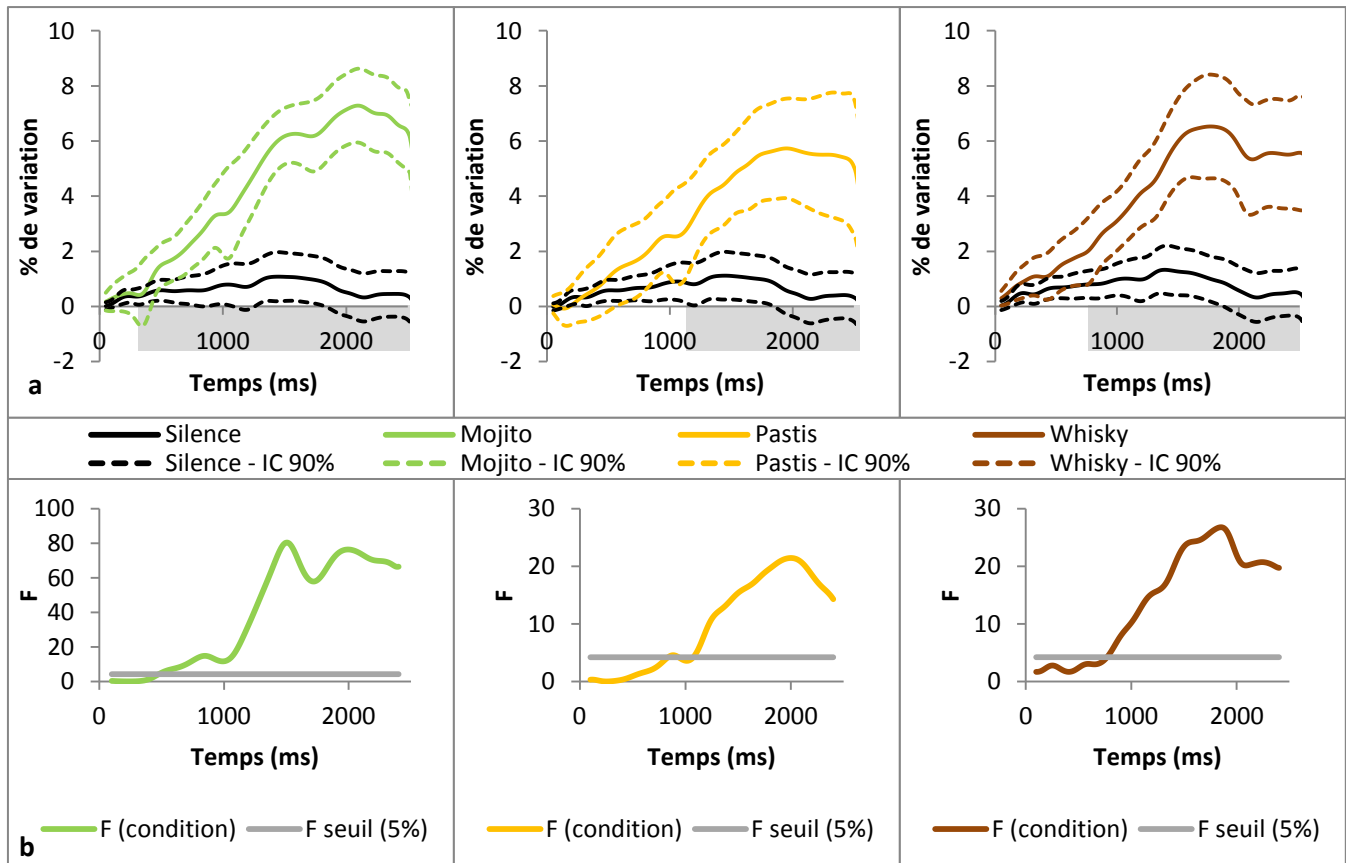
3.3. Réactions pupillaires

3.3.1. Réponses pupillaires aux odeurs

Comparaison des réponses pupillaires consécutives aux odeurs à celle durant le silence (variations naturelles de la pupille)

La figure 4 rapporte les résultats obtenus lors de la comparaison des réponses pupillaires consécutives à chaque odeur aux variations naturelles de la pupille à partir de 29 sujets retenus pour les odeurs de mojito et de pastis et 28 sujets retenus pour l'odeur de whisky.

L'observation des graphiques de l'évolution du pourcentage de variation semble indiquer que les 3 odeurs entraînent une dilatation pupillaire significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille avec un pic autour de 2000ms (Figure 81(a)). Au regard de la statistique F calculée dans le temps grâce à la comparaison temps par temps et rapportée sur la Figure 81 (b), la dilatation semblait plus importante pour le mojito ; la statistique F atteint la valeur de 80 pour un seuil de significativité à 5% de 4,20 alors que pour un seuil de significativité équivalent, la statistique F n'atteint pour le pastis et le whisky, « que », respectivement 21 et 27. Les odeurs de mojito, pastis et whisky entraînent finalement toutes les trois une dilatation significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille sur des périodes relativement longues [respectivement, 450ms –fin, 1050ms – fin et 750ms-fin]. Enfin, ces résultats ont été renforcés par les résultats de l'ACP. Pour chaque ACP, une seule composante a été retenue et rapportait respectivement pour la comparaison des odeurs de mojito, pastis et whisky au silence 84,32%, 86,28% et 82,78% de la variance totale. Cette première composante, corrélée au diamètre moyen de la pupille pour les trois comparaisons (mojito: $R = 0,997$, $p < 0,001$; pastis : $R = 0,998$, $p < 0,001$; whisky : $R = 0,988$, $p < 0,001$) a été soumise à une analyse de la variance avec sujet et condition (odeur ou silence) comme facteurs pour chaque odeur. Les résultats révèlent un effet condition pour les trois odeurs [mojito: $F(1, 28) = 67,60$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,49$; pastis : $F(1, 28) = 18,63$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,27$; whisky : $F(1, 27) = 22,90$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,33$].



Comparaison des odeurs entre elles

On compare ensuite les 3 odeurs entre elles ; la Figure 82 rapporte les résultats obtenus à partir de 24 sujets retenus. Les résultats de l'évolution du pourcentage de variation dans le temps semblent indiquer une dilatation similaire pour les 3 odeurs bien que peut-être légèrement inférieure pour le pastis (Figure 82 (a)). L'analyse de la variance à 2 facteurs, sujet et odeur réalisée sur les pics de dilatation confirme la première supposition, la dilatation est équivalente pour les 3 odeurs [$F(2,46) = 0,13$, $p = 0,876$] (Figure 82 (b)). Enfin, la comparaison temps par temps confirme ces observations en ne mettant en évidence aucune différence (Figure 82 (c)).

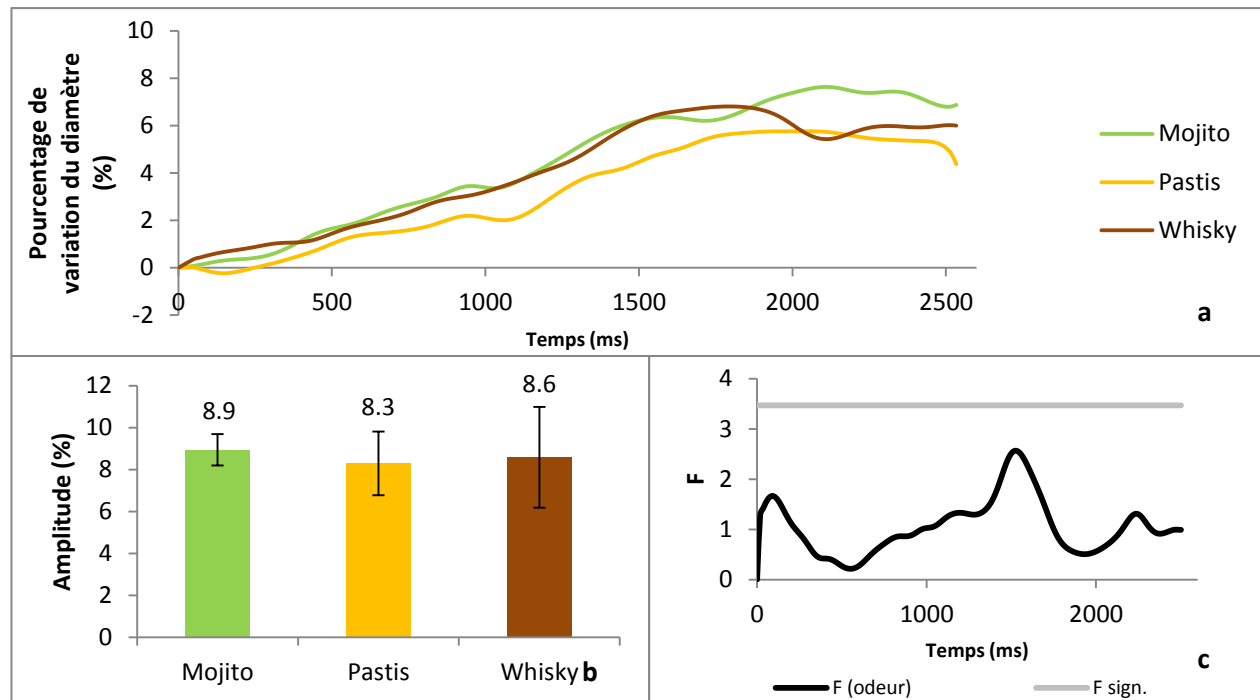


Figure 82. Résultats de la comparaison des réponses pupillaires consécutives aux 3 stimulations olfactives

(a) *Evolution du pourcentage de variation*

(b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*

(c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur odeur en fonction du temps*

3.3.2. Réponses pupillaires aux ambiances

Comparaison des réponses pupillaires durant l'écoute d'ambiances à celle durant le silence (variations naturelles de la pupille)

De la même manière que pour les odeurs, on a tout d'abord comparé chaque ambiance au silence, à savoir, aux variations naturelles de la pupille. La Figure 83 rapporte les résultats de ces comparaisons. Ces résultats ont été obtenus à partir de 35 sujets pour les ambiances latino et bureau, 34

sujets pour les ambiances provençale et irlandaise, 36 sujets pour l'ambiance douche et 33 sujets pour l'ambiance voiture.

Pour chacune des ambiances, la réponse pupillaire semble supérieure aux variations naturelles de la pupille hormis pour l'ambiance provençale (Figure 83(a)). En effet, les résultats des comparaisons temps par temps sur moyennes mobiles montrent une réponse pupillaire pendant l'écoute des ambiances latino, irlandaise, bureau, douche et voiture significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille sur des périodes plus ou moins longues [latino : 500ms-fin, irlandaise : 250ms-fin, bureau : 700ms-fin, douche : 100ms-fin et voiture : 100ms-1700ms]. En revanche, aucune différence n'est observée pour l'ambiance provençale, la réponse pupillaire lors de l'écoute de cette ambiance était équivalente aux variations naturelles de la pupille (Figure 83(b)). Ces résultats ont été renforcés par les résultats des ACP dont la première et seule composante (83,20%, 79,74%, 82,80%, 88,22% et 82,05% de la variance totale, respectivement pour les ambiances latino, irlandaise, bureau, douche et voiture) corrélée à la réponse moyenne [latino : $R = 0,999$, $p < 0,001$; irlandaise: $R = 0,998$, $p < 0,001$; bureau : $R = 0,994$, $p < 0,001$; douche : $R = 0,997$, $p < 0,001$ et voiture : $R = 0,995$, $p < 0,001$] a été soumise à une analyse de la variance avec sujet et condition comme facteurs. Les résultats révèlent un effet condition [latino : $F(1, 34) = 5,96$, $p = 0,020$, $\eta^2 = 0,09$; irlandaise: $F(1, 33) = 13,09$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,12$; bureau : $F(1, 34) = 10,69$, $p = 0,002$, $\eta^2 = 0,16$; douche : $F(1, 35) = 19,68$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,26$ et voiture : $F(1, 32) = 12,24$, $p = 0,001$, $\eta^2 = 0,18$].

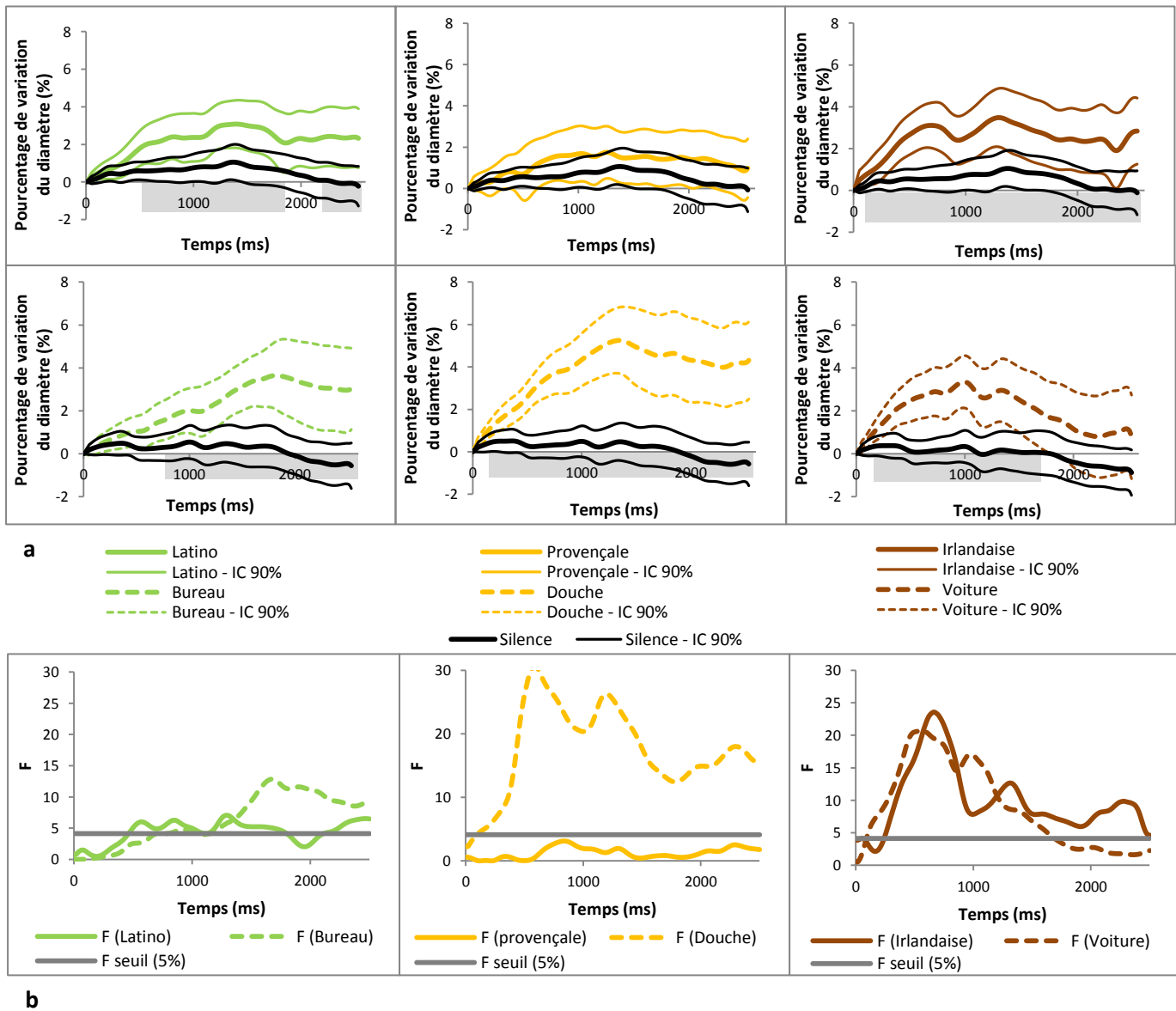


Figure 83. Résultats de la comparaison de chaque ambiance au silence

- (a) *Évolution du pourcentage de variation (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)*
- (b) *Résultats de la comparaison temps par temps – Évolution de la statistique F du facteur condition en fonction du temps*

Comparaison des ambiances entre elles

Nous avons ensuite **comparé les ambiances entre elles**. La Figure 84 rapporte les résultats de cette comparaison obtenus à partir de 20 sujets retenus. La Figure 84 (a) rapporte l'**évolution du pourcentage de variation** pour l'ensemble des 6 ambiances. D'après l'observation de ce premier graphique, il semblerait que l'ambiance douche soit celle entraînant la plus forte dilatation pupillaire alors que l'ambiance provençale serait celle qui entraînerait la plus faible. Ces résultats sont confirmés et

complétés par le calcul des **pics de dilatation** pour chaque ambiance. En effet, l'analyse de variance de ces pics de dilatation à 2 facteurs, sujet et ambiance, révèle un effet ambiance [$F(5,95) = 2,58$, $p = 0,032$, $\eta^2 = 0,10$]. Les tests de comparaison multiple de Tukey indiquent que (1) le pic de dilatation observé durant l'ambiance douche est supérieur à ceux observés durant les ambiances provençale et voiture et (2) le pic de dilatation observé durant l'ambiance bureau est supérieur à celui observé durant l'ambiance provençale (Figure 84(b)). Les résultats de la **comparaison temps par temps** viennent compléter ces observations en indiquant une période significative entre 1000ms et 1900ms : (1) au point le plus significatif observé (aux environs de 1250ms) correspondant au pic de dilatation de l'ambiance douche, nous constatons une dilatation pupillaire supérieure pour l'ambiance douche par rapport aux ambiances provençale, irlandaise et voiture et (2) en moyenne sur cette même période, on retrouve exactement les mêmes observations que pour les pics de dilatation (Figure 84(c)). De manière logique, les résultats de l'ACP viennent confirmer ces conclusions puisque la première et seule composante retenue (92,54% de la variance totale) étant corrélée au signal moyen ($R=0,999$, $p < 0,001$), on retrouve les résultats observés lors de la comparaison temps par temps avec les tests de comparaison multiple sur la moyenne de la période significative qui était déjà les résultats observés à partir des pics de dilatation : (1) le pic de dilatation observé durant l'ambiance douche est supérieur à ceux observés durant les ambiances provençale et voiture et (2) le pic de dilatation observé durant l'ambiance bureau est supérieur à celui observé durant l'ambiance provençale.

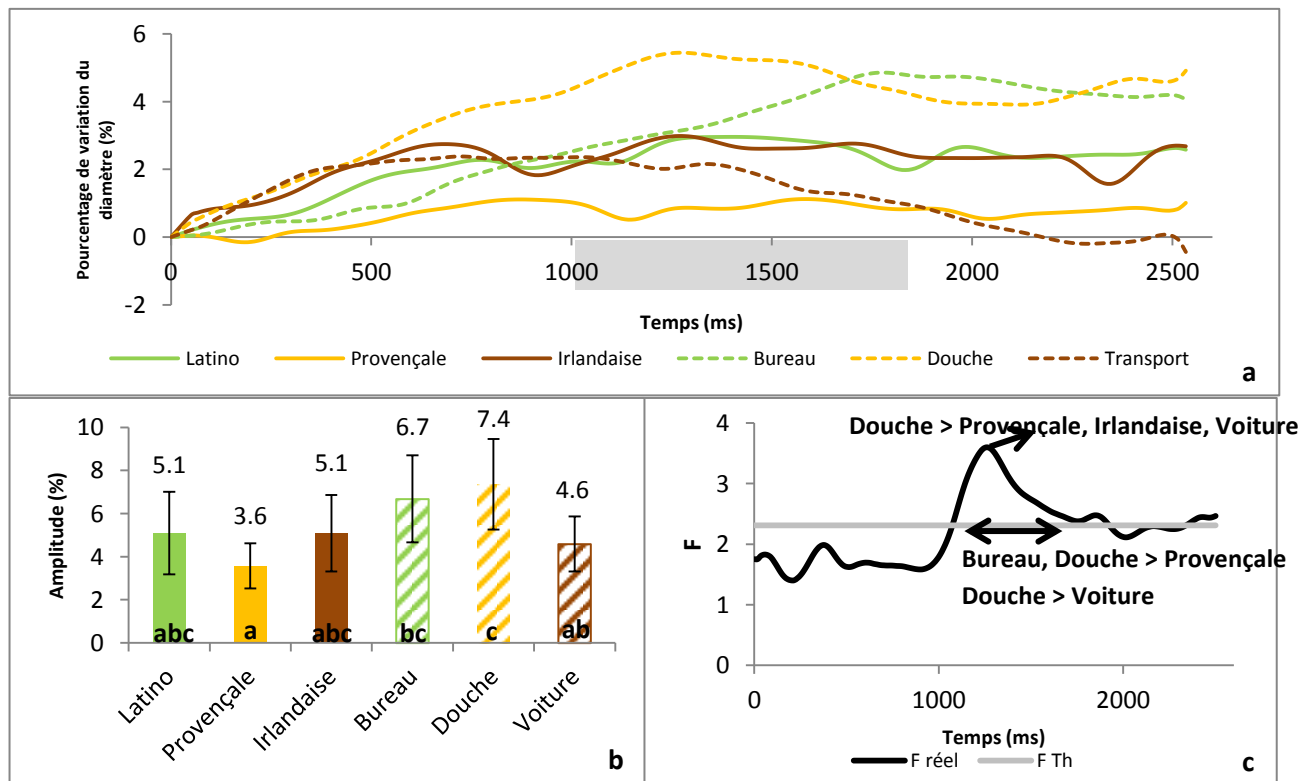


Figure 84. Résultats de la comparaison des 6 ambiances entre elles

- (a) **Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base** (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)
- (b) **Pics de dilatation** (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre ambiances - 2 ambiances n'ayant aucune lettre en commun entraînent un pic de dilatation différent)
- (c) **Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur ambiance en fonction du temps**

Comparaison des types d'ambiance entre eux

Enfin, nous avons ensuite **comparé les types d'ambiance entre eux**. La Figure 85 rapporte les résultats de cette comparaison obtenus à partir de 20 sujets retenus.

La Figure 85(a) rapporte **l'évolution du pourcentage de variation** pour l'ensemble des 3 conditions d'ambiance. D'après l'observation de ce premier graphique, il semblerait que les deux types d'ambiance entraînent une dilatation significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille. De plus, il semblerait que les ambiances non congruentes entraînent une plus forte dilatation que les ambiances congruentes. Cette deuxième observation est confirmée par le calcul des **pics de dilatation** pour chaque type d'ambiance. En effet, l'analyse de variance de ces pics de dilatation à 2 facteurs, sujet et type d'ambiance, révèle une tendance pour le facteur type d'ambiance [$F(1,19) = 3,79$, $p = 0,066$, $\eta^2 = 0,09$] ; le pic de dilatation est plus fort pour les ambiances non congruentes que pour les ambiances congruentes (Figure 85(b)). Les résultats de la **comparaison temps par temps** viennent compléter ces résultats en mettant en évidence des différences significatives entre chaque type d'ambiance et le silence mais de manière contradictoire avec les pics de dilatation, pas entre types d'ambiances (Figure 85(c)). Les résultats de l'ACP viennent confirmer cette seconde version : la première et seule composante retenue (87,10% de la variance totale), corrélée au signal moyen ($R=0,997$, $p < 0,001$), a été soumise à une analyse de la variance à 2 facteurs (sujet et condition) et mis en évidence un effet condition [$F(2,38) = 5,92$, $p = 0,006$, $\eta^2 = 0,19$] ; la réponse pupillaire moyenne des ambiances congruentes et celle des ambiances non congruentes sont significativement supérieures aux variations naturelles de la pupille mais pas différentes entre elles. Ces résultats sont similaires à ceux observés dans l'expérience 2 du précédent chapitre.

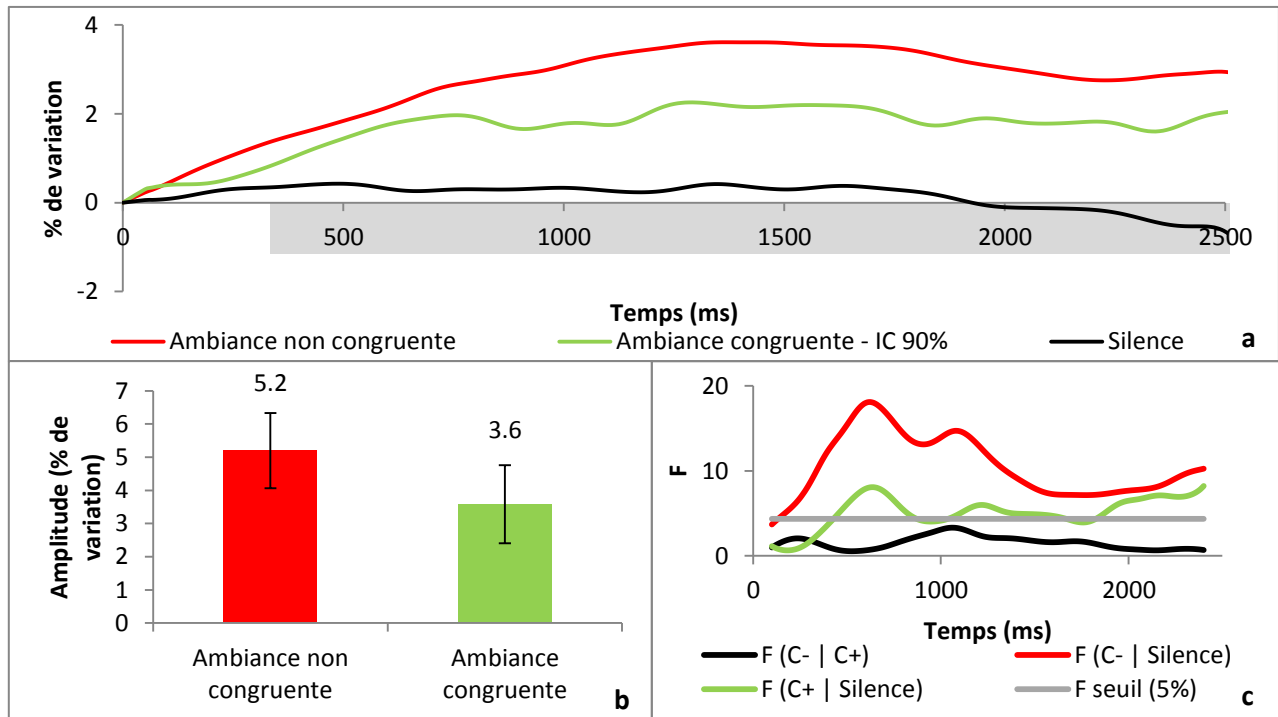


Figure 85. Résultats de la comparaison des types d'ambiance entre elles

- (a) *Évolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Évolution de la statistique F du facteur condition d'ambiance en fonction du temps*

3.3.3. Comparaison des réponses pupillaires aux odeurs et aux ambiances

La Figure 86 rapporte les résultats obtenus à partir de 17 sujets retenus (nombre de sujets faible car n'ont été retenus que les sujets ayant un bon enregistrement sur toutes les ambiances et au moins une odeur en raison des différences existantes entre les ambiances) lors de la comparaison des réponses pupillaires aux odeurs et celles des ambiances.

Sur la Figure 86(a), on observe une **réponse pupillaire** similaire pour les deux types de stimulation jusqu'à environ 1000ms puis les odeurs se détachent jusqu'à atteindre une dilatation deux fois supérieure à celle observée pour les ambiances. Le **pic de dilatation** moyen a été calculé pour chaque condition (odeur ou ambiance) et chaque sujet pour être soumis à une analyse de variance à 2 facteurs, sujet et condition. Les résultats révèlent une tendance pour le facteur condition [$F(1,16) = 3,74$, $p = 0,071$, $\eta^2 = 0,12$], le pic de dilatation avait tendance en moyenne à être plus important pour les odeurs que pour les ambiances (Figure 86(b)). Les résultats de la **comparaison temps par temps** sur moyennes mobiles confirment ce résultat en mettant en évidence une différence à partir d'environ 1400ms jusqu'à la fin (Figure 86(c)). Enfin, ce résultat a été renforcé par les résultats de l'ACP. La première et seule composante retenue lors de l'analyse (93,70% de la variance totale), corrélée à la réponse pupillaire moyenne ($R=0,999$, $p < 0,001$) a été soumise à une analyse de la variance avec sujet et condition comme facteurs. Les résultats révèlent un effet condition [$F(1,16) = 8,94$, $p = 0,009$, $\eta^2 = 0,22$].

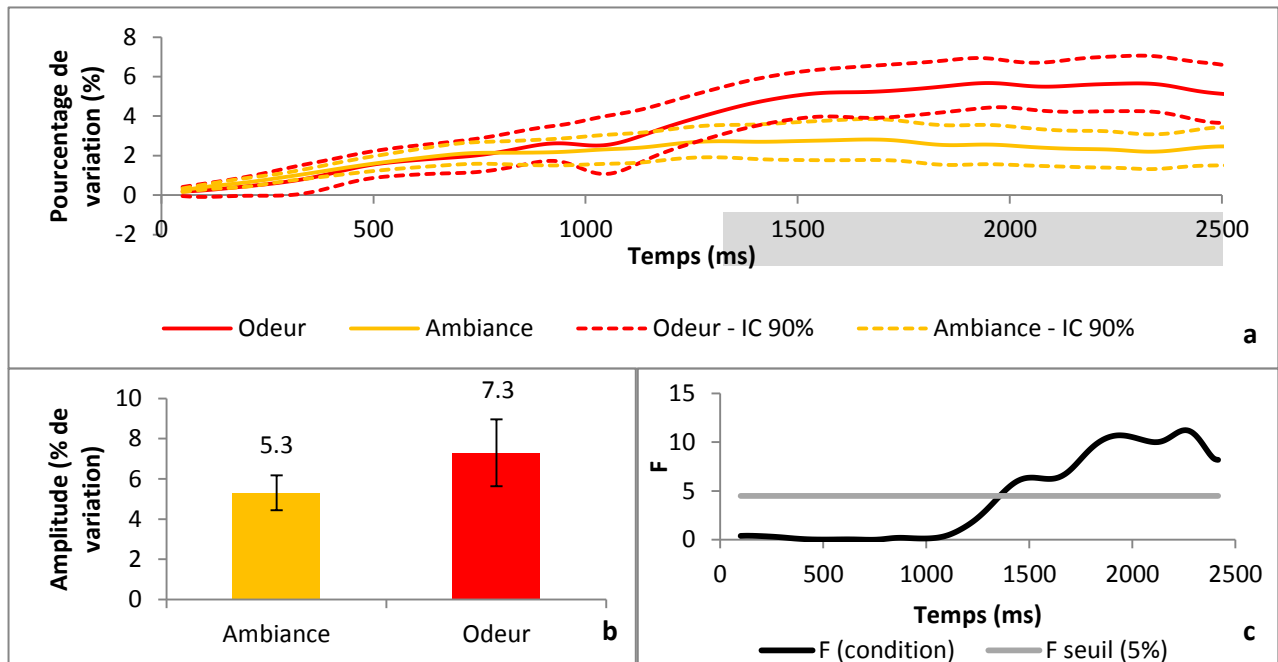


Figure 86. Résultats de la comparaison des réponses pupillaires moyennes consécutives aux odeurs et durant les ambiances

- (a) *Evolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base (la partie grisée représente la période où des différences significatives entre les stimuli sont observables – report des résultats de la comparaison temps par temps)*
- (b) *Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)*
- (c) *Résultats de la comparaison temps par temps – Evolution de la statistique F du facteur type de stimulus en fonction du temps*

3.3.4. Comparaison des réponses pupillaires moyennes consécutives aux odeurs dans les différentes conditions

La Figure 87 rapporte l'ensemble des résultats obtenus à partir des 11 sujets retenus lors de la comparaison des réponses pupillaires moyennes consécutives aux odeurs dans les différentes conditions (nombre de sujets faible car n'ont été retenus que les sujets ayant un bon enregistrement sur toutes les odeurs dans toutes les conditions en raison des différences existantes entre les ambiances).

Une dilatation pupillaire est observable sur les courbes d'évolution du **pourcentage de variation** dans les 3 conditions avec un pic de variation entre 1700ms et 2000ms qui semble supérieur dans les conditions silence et ambiance non congruente par rapport à la condition ambiance congruente (Figure 87 (a)). Les résultats de l'analyse de variance à 2 facteurs, sujet et condition, des **pics de dilatation** moyens ne confirment pas cette observation en ne mettant en évidence aucun effet condition [$F(2,28) = 1,08$, $p = 0,352$] (Figure 87 (b)) ; le pic de dilatation était équivalent dans chacune des conditions. Les résultats de la **comparaison temps par temps** appuient ces résultats en ne mettant en évidence aucune différence (Figure 87(c)).

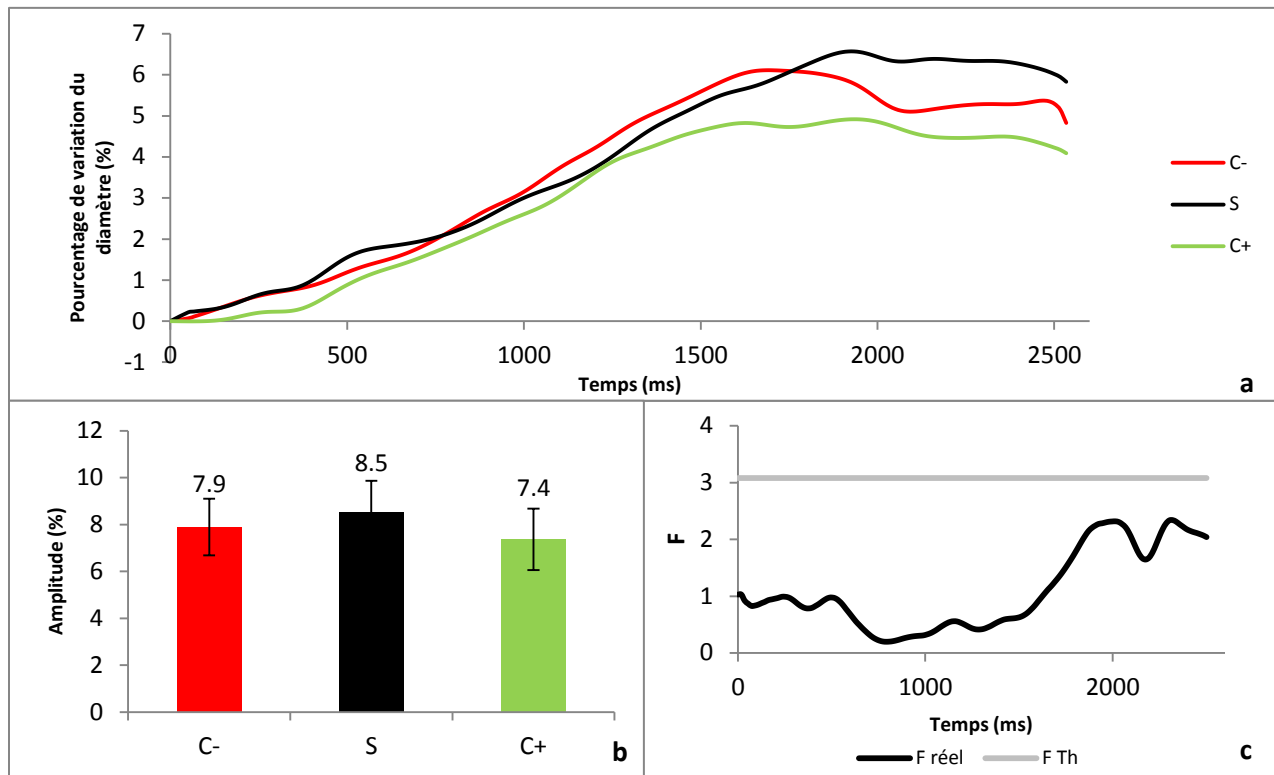


Figure 87. Résultats de la comparaison des réponses pupillaires moyennes consécutives aux odeurs dans les différentes conditions (C- : ambiance non congruente, S : Silence, C+ : ambiance congruente)

- (a) Évolution du pourcentage de variation par rapport à la ligne de base
- (b) Pics de dilatation (les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)
- (c) Résultats de la comparaison temps par temps – Évolution de la statistique F du facteur condition en fonction du temps

3.4. Questionnaire d'émotions

A chaque séance, les sujets devaient remplir un questionnaire sur leur état émotionnel avant de commencer le test. Celui-ci constituait l'état émotionnel initial. Ensuite, ils répondaient au questionnaire après chaque combinaison musique/produit. Pour avoir la notation des émotions de chaque combinaison musique/produit, les notes du blanc de la séance correspondante ont été retranchées. Ainsi, cela permet de connaître l'état émotionnel du sujet relatif à son état émotionnel initial.

3.4.1. Analyse en composantes principales

De la même manière que pour l'expérience 3 présentée dans le précédent chapitre, on a tout d'abord réalisé une **Analyse en Composantes Principales** non normée avec comme observations, les questionnaires (un sujet * une condition) et comme variables, les items d'émotion. La représentation des items d'émotion projetés sur les deux premières dimensions (64,88% de l'information) est proche de celle obtenue lors de la dernière expérimentation à la différence près que les émotions « négatives » ne semblent plus corrélées à la seconde dimension (Figure 88(a)). En revanche, elles semblent corrélées à la troisième dimension (Figure 88(b)). Aussi, le dégoût semble corrélé négativement à la première dimension. Ainsi, on retrouve une bonne corrélation entre les émotions « positives » et la première dimension [excitation: $R = 0,78$, joie: $R = 0,87$, attirance : $R = 0,85$]. La « surprise » est cette fois-ci surtout corrélée à la seconde dimension et non plus aux deux premières dimensions comme lors de la précédente expérimentation [Dim1: $R = 0,34$, Dim2: $R = 0,91$]. Enfin, on retrouve des émotions « négatives » non plus corrélées à la seconde dimension mais à la troisième [tristesse : $R = 0,55$, dégoût : $R = 0,60$, peur : $R = 0,44$ et colère : $R = 0,66$] et le dégoût corrélé à la première dimension [$R = -0,62$].

Nous avons ensuite observé la projection des variables illustratives sur le premier plan factoriel (Figure 88(c)) et également sur les dimensions 1 et 3 (Figure 88(d)). Cette projection montre des résultats bien différents des précédents. Pour rappel, lors de la précédente expérimentation, l'état émotionnel du sujet était auto-évalué sur ce même questionnaire suite à la dégustation de 6 produits dans 3 conditions de musique. Nous avons observé que les conditions « musique appréciée » et « musique non appréciée » avaient respectivement des coordonnées positives et négatives sur la première dimension et le silence, des coordonnées proches de 0 sur cette même dimension. Pour les produits, seule la marque nationale de pâte à tartiner (Nutella) avait des coordonnées légèrement positives sur la première dimension. Ici, c'est l'inverse, on observe pour les 3 produits (les odeurs), des coordonnées négatives sur la première dimension pour le whisky et positives pour le mojito et le pastis. En revanche, les ambiances, ont des coordonnées positives sur la première dimension pour les ambiances congruentes, négatives pour les ambiances non congruentes et légèrement négatives pour le silence mais toutes ces coordonnées sont beaucoup plus faibles. Il semblerait que cette fois-ci ce soient les stimuli olfactifs les stimuli les plus émotionnels et non plus les stimuli auditifs.

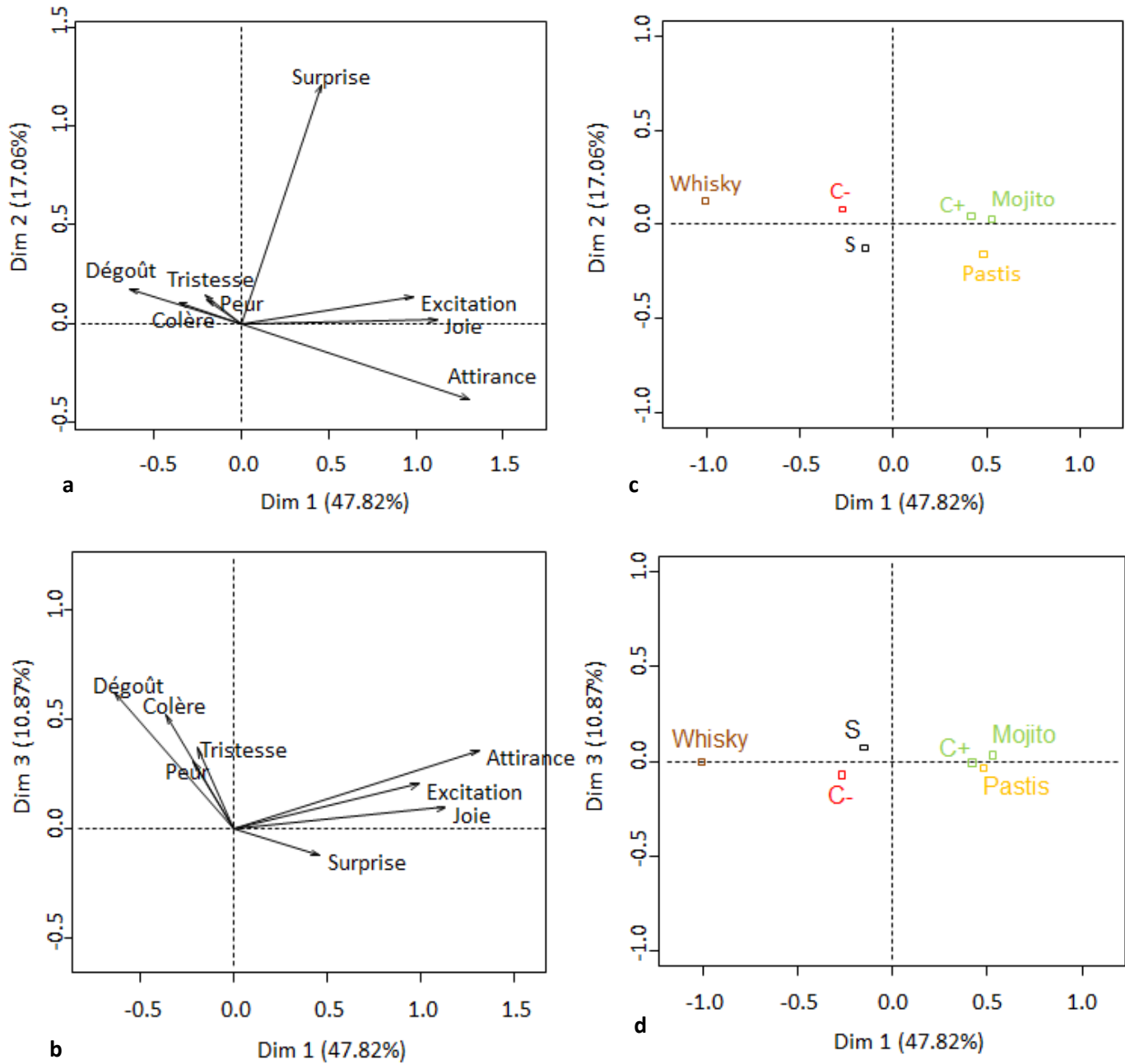


Figure 88. Résultats graphiques de l'ACP (C- : Ambiance non congruente, C+ : Ambiance congruente, S : Silence)

(a) représentation des items d'émotion projetés sur les dimensions 1 et 2

(b) représentation des items d'émotion projetés sur les dimensions 1 et 3

(c) projection des variables illustratives sur les dimensions 1 et 2

(d) projection des variables illustratives sur les dimensions 1 et 3

3.4.2. Analyse de la variance

On réalise ensuite, des analyses de variance à 3 facteurs (sujet, ambiance, odeur) avec interaction (ambiance*odeur) pour chaque item d'émotion. Lorsque cela était approprié, des tests de comparaison multiple de Tukey ont été utilisés afin de déterminer les conditions entre lesquelles il existe des différences significatives. Le Tableau 44 rapporte les résultats.

Tableau 44. Analyses de la variance à 3 facteurs, sujet, odeur et ambiance avec interaction odeur*ambiance de chaque item d'émotions

	Attirance	Colère	Dégoût	Excitation	Joie	Peur	Surprise	Tristesse
Sujet	*	*	*	*	*	*	*	*
Odeur	M, P > W	W > M, P	W > M, P	M, P > W	M, P > W	W > P	--	M, W > P
Ambiance	--	--	--	C+ > C-, S	C+ > C-, S	--	--	S > C+, C-
Odeur*	--	--	--	--	--	--	--	S > C+, C-
Ambiance	--	--	--	--	--	--	--	uniquement pour l'odeur Mojito

M : Mojito

P : Pastis

W : Whisky

* : significatif au seuil de 5%

S : Silence

M+ : Musique appréciée

M- : Musique non appréciée

Comme pour la précédente expérimentation, pour interpréter ces résultats, on représente pour chaque odeur et chaque condition d'ambiance, les scores corrigés pour chaque item d'émotion.

Résultats émotionnels pour les odeurs

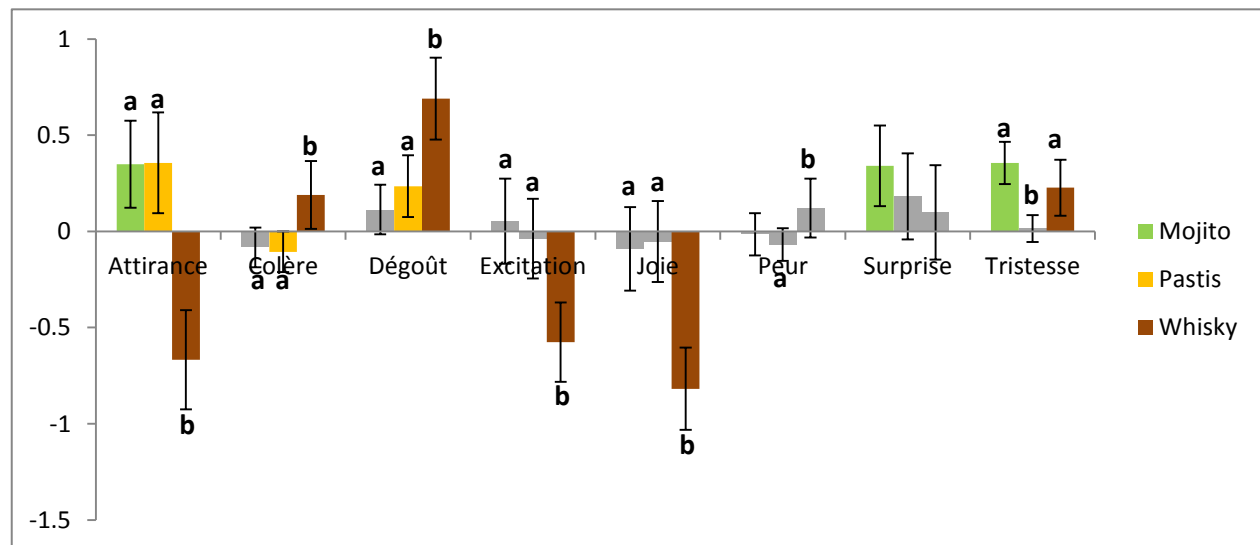


Figure 89. Score corrigé pour chaque item d'émotion pour chacune des odeurs

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les barres grisées signifient que le score n'est pas significativement différent de 0 ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre odeurs - par item, 2 odeurs ayant une lettre différente entraînent un ressenti différent de l'émotion en question)

La Figure 89 rapporte les scores corrigés de chaque item d'émotion pour chaque odeur. Les odeurs n'entraînant ni augmentation ni diminution du ressenti de l'émotion par rapport à l'état émotionnel de départ (non significativement différent de 0) ont été grisées. On remarque sur ce graphique que :

- Le mojito entraîne une augmentation de l'attirance, de la surprise et de manière étonnante de la tristesse
- Le whisky, qui semble être l'odeur la plus émotionnelle, entraîne une augmentation du dégoût et de la colère et une diminution des émotions « positives » (attirance, excitation et joie)
- Le pastis augmente de manière contradictoire, l'attirance et le dégoût et diminue la colère

Si on regarde les résultats des ANOVA (Tableau 44), on constate que seule la surprise ne discrimine pas les odeurs. Ensuite, on remarque que la peur discrimine l'odeur de whisky de l'odeur de pastis mais globalement nous avons observé que le ressenti de la peur avec les odeurs était équivalent à l'état émotionnel de départ. Egalement, la tristesse discrimine les odeurs de whisky et de mojito de l'odeur de pastis, elles entraînent toutes les deux plus de tristesse ce qui est plutôt étonnant pour le mojito. Enfin, toutes les autres émotions discriminent les odeurs de pastis et mojito de l'odeur de whisky. Globalement l'odeur de whisky entraîne plus d'émotions « négatives » et surtout diminue les émotions « positives » alors que les odeurs de mojito et pastis ont plutôt des profils inverses, ou alors elles n'ont pas d'impact.

Résultats émotionnels pour les ambiances

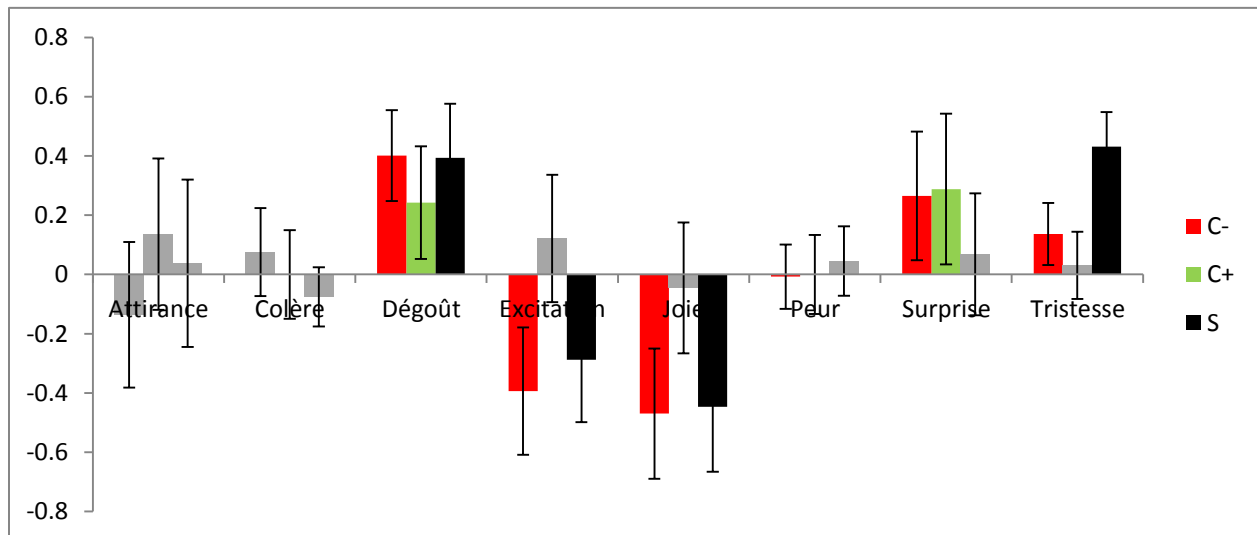


Figure 90. Score corrigé pour chaque item d'émotion pour chacune des conditions d'ambiance (C- : ambiance non congruente, C+ : ambiance congruente, S : Silence)

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes ; les barres grisées signifient que le score n'est pas significativement différent de 0 ; les lettres permettent de mettre en évidence les différences entre conditions de musique - *par item*, 2 conditions de musique ayant une lettre différente entraînent un ressenti différent de l'émotion en question)

La Figure 90 rapporte les scores corrigés de chaque item d'émotion pour chaque type d'ambiance. Les ambiances n'entraînant ni augmentation ni diminution du ressenti de l'émotion par

rapport à l'état émotionnel de départ (non significativement différent de 0) ont été grisées. On remarque sur ce graphique que :

- De manière surprenante les 3 conditions entraînent le dégoût
- Les conditions ambiance non congruente et silence diminuent la joie et l'excitation et augmentent la tristesse
- Les 2 types d'ambiances entraînent la surprise

Si on regarde les résultats des ANOVA (Tableau 44), on constate que seule l'excitation, la joie et la tristesse discriminent les conditions d'ambiance : l'ambiance congruente ne diminue pas l'excitation et la joie contrairement à l'ambiance non congruente et le silence augmente plus la tristesse que les deux autres types d'ambiance.

3.5. Lien entre la réponse pupillaire et les données déclaratives

3.5.1. Réponses pupillaires et données hédoniques

Les réponses pupillaires pour les trois odeurs étaient équivalentes alors qu'en terme hédonique, l'odeur de mojito a été préférée aux deux autres. De plus, des différences en terme de réponse pupillaire ont été observées entre les ambiances mais celle-ci n'étaient pas en accord avec les données hédoniques. Une nouvelle fois, ces résultats suggèrent que les émotions ne sont pas nécessairement liées à la préférence.

3.5.2. Réponses pupillaires et au questionnaire d'émotions

Les réponses pupillaires ainsi que les résultats du questionnaire d'émotions suggèrent tous les deux que les odeurs impactent l'état émotionnel du sujet. Pour la pupille, cela se manifeste par une dilatation, le diamètre pupillaire augmente de manière équivalente pour les trois odeurs. Pour les scores d'émotion, cela se manifeste :

- pour le mojito, par une augmentation de l'attirance, de la surprise et de la tristesse
- pour le whisky par une augmentation du dégoût et de la colère et une diminution des émotions « positives » (attirance, excitation et joie)
- pour le pastis, par une augmentation de l'attirance et du dégoût et une diminution de la colère

Les réponses pupillaires ainsi que les résultats du questionnaire d'émotions suggèrent également tous les deux que l'écoute d'ambiance impacte l'état émotionnel du sujet mais plus modérément. En effet, la dilatation pupillaire est plus faible. Egalement, les scores émotionnels sont plus faibles mais permettent tout de même de montrer que les ambiances non congruentes diminuent la joie et l'excitation et augmentent la tristesse et que les deux types d'ambiances augmentent la surprise et de manière plus surprenante, le dégoût.

En revanche, alors que les scores émotionnels permettent de discriminer émotionnellement les odeurs et les types d'ambiance, le diamètre pupillaire ne le permet pas. L'explication pourrait être la même que pour l'expérience 3 du précédent chapitre : en réponse pupillaire on va uniquement mesurer l'activation d'émotions de manière globale alors qu'en questionnaire on peut mesurer l'augmentation mais aussi la diminution et ce sur plusieurs items, ce qui permet de mieux discriminer les odeurs et/ou types d'ambiance. Très probablement qu'avec un questionnaire si on travaillait sur une note d'émotion

moyenne, on ne mettrait pas en évidence autant de différence. Pour vérifier cette hypothèse une analyse de la variance des moyennes des items à 3 facteurs (sujet, condition et odeur) avec interaction (condition*odeur) a été réalisée. Contrairement à ce que nous pouvions penser, on conserve une discrimination des odeurs et des ambiances ; les ambiances congruentes et le whisky ressortent plus émotionnels. Cependant, il semblerait que cette discrimination soit plus sur la valence que sur l'intensité ce qui expliquerait pourquoi ceci ne se retrouve pas au niveau de la pupille.

3.6. Impact de la congruence sur la notation hédonique et le temps de réponse à la question « Aimez-vous cette odeur ? »

L'objectif de ce dernier paragraphe est de répondre à notre dernière hypothèse :

Hypothèse n°4 : « Le contexte a un impact sur l'appréciation hédonique des produits et le temps de réponse à la question « Avez-vous aimé cette odeur ? » ; l'appréciation hédonique augmente avec la congruence pendant que le temps de réponse diminue »

3.6.1. Impact de la congruence sur la notation hédonique

Les notes d'appréciation ont été récupérées pour chaque odeur, chaque sujet et chaque condition (silence, ambiance congruente, ambiance non congruente). Ces notes ont ensuite été soumises une ANOVA avec sujet, odeur et condition comme facteurs avec interaction (odeur * condition). On retrouve alors l'effet odeur mentionné au paragraphe 2.5.1. Appréciation des odeurs et des ambiances [$F(2,344)=50,65$, $p<0.001$, $\eta^2=0.17$]. Pour l'effet condition, nous observons une légère tendance [$F(2, 344)=1,31$, $p= 0,270$] ; celle-ci va dans le sens de notre hypothèse, les notes en condition non congruente étaient inférieures par rapport aux notes en condition silence, elles-mêmes inférieures à celles en condition congruente (Figure 91). L'interaction odeur*condition n'est pas significative [$F(4, 344)=0,42$, $p=0.795$].

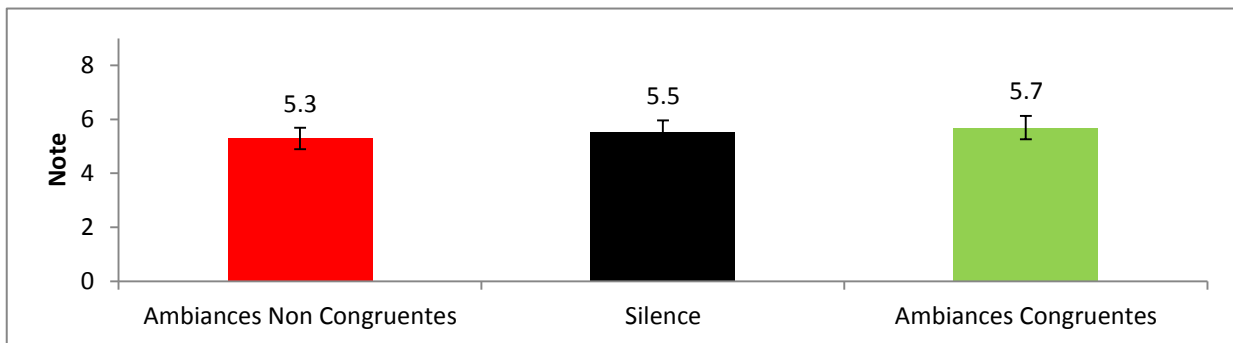


Figure 91. Notation hédonique moyenne des odeurs en fonction de l'ambiance

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

3.6.2. Impact de la congruence sur le temps de réponse à la question « Aimez-vous cette odeur ? »

Vérification de la compréhension de la tâche

Lors de l'expérience, au moment de la phase d'olfaction, les sujets devaient appuyer sur une touche du clavier pour dire s'ils aimaient ou non l'odeur. Dans un premier temps, pour vérifier que les sujets avaient bien compris la tâche nous avons cherché à vérifier la concordance entre les notes d'appréciation et les réponses. Pour cela, les notes d'appréciation ont été récupérées et classées en 2 catégories : « Oui, j'aime » pour les notes supérieures ou égales à 5 ou « Non, je n'aime pas » pour les notes strictement inférieures à 5. Nous avons alors calculé le pourcentage de concordance entre les résultats de ce classement et les réponses à la question « Aimez-vous cette odeur ? » durant le test. Le taux de concordance était de **83%**. On peut donc estimer que les sujets ont compris la tâche à effectuer.

Etude de l'impact de la congruence sur le temps de réponse

Les temps de réponse pour chaque odeur, chaque sujet et chaque condition (silence, ambiance congruente, ambiance non congruente) ont été récupérés. Les temps de réponse ont ensuite été soumis à une ANOVA avec sujet, odeur et condition comme facteurs, avec interaction condition*odeur. Les résultats ne révèlent ni effet condition [$F(2,336) = 0,19$, $p = 0,8277$], ni interaction odeur*condition [$F(4,336) = 0,43$, $p = 0,788$]. En revanche, on remarque une tendance pour l'effet odeur [$F(2, 336) = 2,27$, $p = 0,105$] ; le temps de réponse avait tendance à être plus long pour l'odeur de whisky que pour les odeurs de mojito et pastis. Notre hypothèse stipulait que « le temps de réponse serait inférieur en condition ambiance congruente » supposant que l'odeur serait plus rapidement reconnue et ainsi que le sujet saurait plus rapidement s'il aime ou pas. Cette hypothèse n'est pas confirmée.

Une autre hypothèse pouvant être formulée concerne l'appréciation, on peut penser que plus le sujet est sûr de sa réponse et plus il va être rapide. Ainsi, il mettrait moins de temps à répondre pour un produit beaucoup aimé ou pas du tout aimé et plus de temps pour un produit intermédiaire. Ce n'est pas ce que les

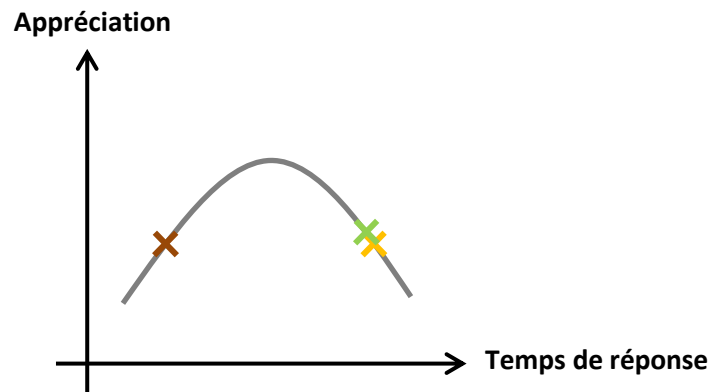


Figure 92. Schéma de l'hypothèse de l'effet de l'appréciation sur le temps de réponse

résultats précédant suggèrent puisque nous avons noté que le temps de réponse avait tendance à être plus long pour l'odeur de whisky que pour les odeurs de mojito et pastis alors que l'on avait noté que les sujets donnaient un meilleur score aux odeurs de mojito ($M = 6,2$, erreur standard = $0,31$) et pastis ($M = 6,4$, erreur standard = $0,35$) qu'à l'odeur de whisky ($M = 4,0$, erreur standard = $0,38$) (cf 3.2. Appréciation des odeurs). Aussi nous n'aurions pas dû observer d'effet (Figure 92). Cependant, si on regarde la répartition des notes en fonction des temps de réponse, on est proche de notre hypothèse : des notes 3

à 4 on a bien la répartition attendue (Figure 93). En revanche, les notes 1, 2 et surtout 9 qui ne s'inscrivent pas dans le schéma. Cependant pour les notes 1 et 2, nous sommes tout de même en dessous d'un temps de réponse pour une note intermédiaire. Pour la note 9 en revanche, c'est le temps de réponse le plus fort observé ; peut-être les sujets ont hésité avant de donner une si bonne note à l'odeur.

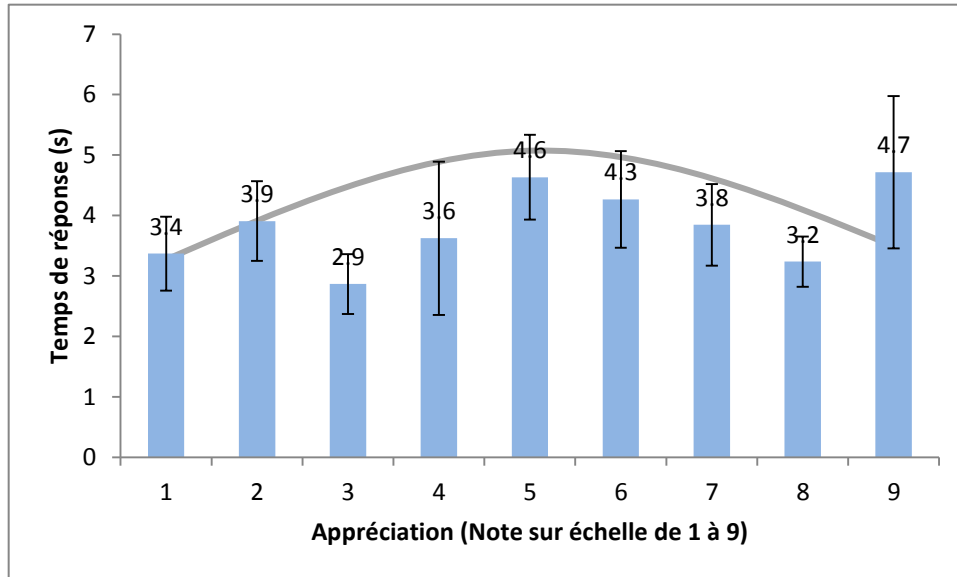


Figure 93. Temps de réponse en fonction de l'appréciation

(les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% des moyennes)

En conclusion, le temps de réponse semble surtout dépendre de l'appréciation du produit comme notre seconde hypothèse le stipule. Aussi, un effet de la congruence sur le temps de réponse aurait pu être observé si la congruence avait une influence sur l'appréciation. Or, nous avons montré dans le paragraphe précédent que ce n'était pas le cas.

4. Conclusion

On constate pour cette expérimentation, une dilatation pupillaire importante consécutivement aux odeurs. Cependant cette dilatation est équivalente pour les 3 odeurs. Le pic de variation moyen observé est de 8,6%, ce qui est supérieur à ce que l'on a pu observer sur les stimuli gustatifs jusqu'ici (4,6% en moyenne). De plus, la mesure de la réponse pupillaire consécutive aux odeurs a moins de risque d'être parasitée puisque le sujet n'a aucun mouvement à faire. C'est pourquoi nous pouvons conclure à un **fort pouvoir émotionnel des odeurs**.

Pour les ambiances, une dilatation pupillaire est également présente mais celle-ci est moins forte, en moyenne le pic de variation atteint 5,4%. La mesure est aussi peu parasitée que celle consécutive aux odeurs, les réponses pupillaires aux odeurs et aux ambiances semblent donc

comparables. On peut donc conclure à **un pouvoir émotionnel plus fort pour les odeurs que pour les ambiances**.

De plus, les ambiances n'ont pas eu d'impact sur la notation hédonique, contrairement aux musiques dans l'expérience 3 du chapitre précédent. Ceci semble cohérent avec la faible dilatation observée ; **les ambiances ne provoquent pas suffisamment d'émotions pour avoir un impact sur la notation hédonique**. Ceci se confirme sur le temps de réponse à la question « Aimez-vous cette odeur ? ». En effet, on a pu constater que ce temps de réponse était principalement lié à l'appréciation hédonique. L'absence d'effet de la congruence sur ce temps de réponse s'explique par l'absence d'effet sur l'appréciation et confirme le trop faible pouvoir émotionnel des ambiances.

Enfin, une nouvelle fois, bien que la réponse pupillaire semble indiquer la présence d'émotions, elle ne les qualifie pas, **nous insistons donc sur l'importance d'associer un questionnaire pour qualifier les émotions**.

DISCUSSION GÉNÉRALE

1. Synthèse et discussion des résultats issus de ce travail

Ce travail de thèse avait pour objectif de contribuer à la compréhension de l'influence des émotions sur l'appréciation hédonique des produits alimentaires. L'apport de cette thèse était principalement à **visée méthodologique**. Pour cela, **un outil de mesure fondé sur la pupillométrie**, permettant d'évaluer le pouvoir émotionnel, dans le contexte alimentaire, du produit, du contexte/de l'ambiance et de ces deux éléments combinés de manière **objective** a été développé.

Le **chapitre 3** a présenté l'outil de mesure développé. La méthode rapporte des recommandations allant de l'acquisition (nombre de participants, procédure, construction du test, appareil et installation ainsi que les précautions à prendre) au traitement des données (courbes, pics de dilatation, comparaison temps par temps et ACP) en passant par le pré-traitement des données (extraction, nettoyage et correction de la ligne de base).

Le **chapitre 4** a montré que toute stimulation gustative même l'eau entraînait une dilatation pupillaire et cela, même sans la présence rapportée d'émotions. Il a également mis en évidence un impact des saveurs salée, acide et amère sur le diamètre pupillaire, plus ces stimuli sont présents en forte concentration plus la pupille dilate. Cet effet peut être interprété comme une réponse physiologique automatique ou un rejet des produits qui peut avoir entraîné des émotions négatives.

Le **chapitre 5** a montré que tout produit alimentaire ingéré entraînait une dilatation pupillaire. En moyenne le pic de dilatation observé pour des produits était de 4,6% de variation (contre 3,8% pour l'eau) ce qui suggère que les produits ont un pouvoir émotionnel faible. De plus, les produits ne sont que rarement discriminables par leur pouvoir émotionnel (seule la pâte à tartiner lors d'une expérience s'est différenciée de la compote de pomme). Egalement ce chapitre a permis de montrer qu'une stimulation auditive entraînait elle-aussi une dilatation pupillaire mais plus forte puisqu'en moyenne, le pic de dilatation observé était de 9,2% de variation pour des ambiances sonores et 6,7% de variation pour des musiques appréciées ou non appréciées. Il semblerait donc que le pouvoir émotionnel des stimuli auditifs soit plus fort que celui des produits. De plus, un impact des musiques a été observé sur l'appréciation hédonique avec une surévaluation des produits alimentaires lors de l'écoute de musique aimée. Cela montre que les émotions (codées en mémoire) impactent l'appréciation hédonique renforçant l'idée d'une mémoire multimodale émotionnelle.

Enfin, le **chapitre 6** a montré qu'une stimulation olfactive entraînait elle aussi une dilatation pupillaire et que celle-ci était aussi importante que celles observées pour les stimulations auditives rapportées dans le chapitre 5. En effet le pic de dilatation moyen observé était de 8,6% de variation (8,7% pour les stimuli auditifs). Les odeurs seraient ainsi des vecteurs d'émotion plus forts que les produits. En revanche, nous n'avons pas retrouvé le même pourcentage de variation pour les ambiances. En effet, 6 des 8 ambiances testées dans le chapitre 5 ont été réutilisées mais n'ont conduit qu'à une dilatation pupillaire de 5,4%. De plus, ces ambiances n'ont eu aucun impact sur l'appréciation hédonique des odeurs ni sur le temps de latence à la question « Aimez-vous cette odeur ? » qui semblait principalement dépendre de l'appréciation hédonique.

L'originalité du travail proposé tient principalement à l'utilisation d'une mesure physiologique, le diamètre pupillaire, pour la mesure des émotions alors qu'en science du consommateur, ce sont surtout des méthodes subjectives telles que les questionnaires qui ont jusqu'ici été utilisées. Dans un premier temps, la discussion portera sur les considérations pratiques liées à l'utilisation de la pupillométrie en situation de dégustation. Ensuite, la discussion s'intéressera à l'interprétation des résultats obtenus par pupillométrie pour définir ce que l'on mesure au travers du diamètre pupillaire. Enfin, cette discussion se terminera sur la compréhension des résultats observés.

1.1. La pupillométrie : considérations pratiques

Un des premiers challenges de cette thèse était de développer l'outil de pupillométrie en situation de dégustation afin de pouvoir appréhender de manière objective les émotions, dans le contexte alimentaire. Dans cette première partie, nous allons discuter les aspects pratiques de l'outil développé.

1.1.1. L'appareil de mesure : précision et qualité des données

Dans le chapitre 2, nous avons répertorié de manière non exhaustive, les eye-trackers utilisés pour les études de pupillométrie. Nous avons noté trois principaux fabricants : SensoMotoric Instruments (SMI), Applied Science Laboratories (ASL) et Tobii Technology (Tobii). Les eye-trackers sont des appareils initialement conçus pour mesurer le trajet oculaire du consommateur et fonctionnent pour la plupart sur la technique du reflet cornéen. Le diamètre pupillaire peut ainsi être récupéré. Cependant, on peut se demander quelle est la précision de cette mesure étant donné que ce n'est pas la fonction principale de l'appareil. Afin de connaître la précision de l'appareil avec lequel nous avons travaillé, nous avons mis en place une expérimentation pendant laquelle nous effectuons différentes mesures avec des yeux de verre. Le dispositif mis en place est visible sur la Figure 94 ; deux yeux de verre ont été placés sur une tête en polystyrène, elle-même posée sur une mentonnière. Egalement, ces mêmes résultats ont été utilisés afin de rendre compte de la perte de données inhérente à la mesure sans aucun événement apparent (mouvement, clignement des yeux, etc.).



Figure 94. Mesure de la précision de l'eye-tracker : yeux de verre installés sur une tête en polystyrène, posée sur une mentonnière

Précision

La Figure 95(a) rapporte l'évolution brute (pas de correction, pas de filtrage) du diamètre pupillaire moyen (moyenné sur les deux yeux) mesuré avec des yeux de verre moyennée sur 5 essais. On remarque que le signal est bruité, effectivement, le diamètre pupillaire n'est pas identique en tout point. Cependant nous sommes sur des écarts faibles puisque que le diamètre pupillaire moyen mesuré était

de 4,44mm et il variait au maximum de 4,41mm à 4,46mm. De plus, l'écart-type moyen observé sur chaque temps était de 0,013mm, soit rapporté au nombre d'essais (n=5) un intervalle de confiance moyen de +/- 0,011mm à chaque temps. **Concrètement, à chaque temps, nous avons 95% de chance d'être à +/-0,011mm.**

Pour mieux se rendre compte de la précision que cela représente par rapport à nos mesures, la Figure 95(b) rapporte l'évolution du diamètre pupillaire moyen (moyenné sur les deux yeux) mesuré avec des yeux de verre dans le temps moyennée sur 5 essais mais cette fois-ci après prétraitement. Le prétraitement appliqué a été celui que nous avons défini dans le chapitre 3 :

- un pourcentage de variation a été calculé selon la formule suivante : $\%_{\text{variation}} = \frac{X_{\text{data}} - \text{ref}}{\text{ref}}$ avec en référence, le diamètre pupillaire sur les 200 premières millisecondes
- les données ont été filtrées (moyennes mobiles sur 10 points)

On retrouve le bruit observé sur la première figure mais avec des chiffres plus transposables à nos observations. Ainsi, on note un pourcentage de variation moyen de -0,10% variant au maximum de -0,31% à 0,09%. De plus, l'écart-type moyen observé sur chaque temps était de 0,22%, soit rapporté au nombre de mesures (n=5) un intervalle de confiance moyen de +/- 0,19% à chaque mesure. **Concrètement, à chaque mesure, nous avons 95% de chance d'être à +/-0,19%.** Nous avons pu constater lors de nos expérimentations que nous avons au minimum des pourcentages de variation autour de 3%. La variabilité maximale moyenne observée de 0,31% et l'intervalle de confiance moyen de 0,19% représentent ainsi respectivement environ 10% et 6% de cette dilatation pupillaire ce qui semble correct pour assurer la précision de notre mesure. De plus, on remarque que sur les 2,5 premières secondes, c'est-à-dire la fenêtre utilisée pour nos traitements, le signal est plus stable que sur l'ensemble des 25 secondes (moyenne : -0,02% ; min : -0,13% ; max : +0,03% ; écart-type moyen : 0,18% et intervalle de confiance moyen : +/- 0,16%).

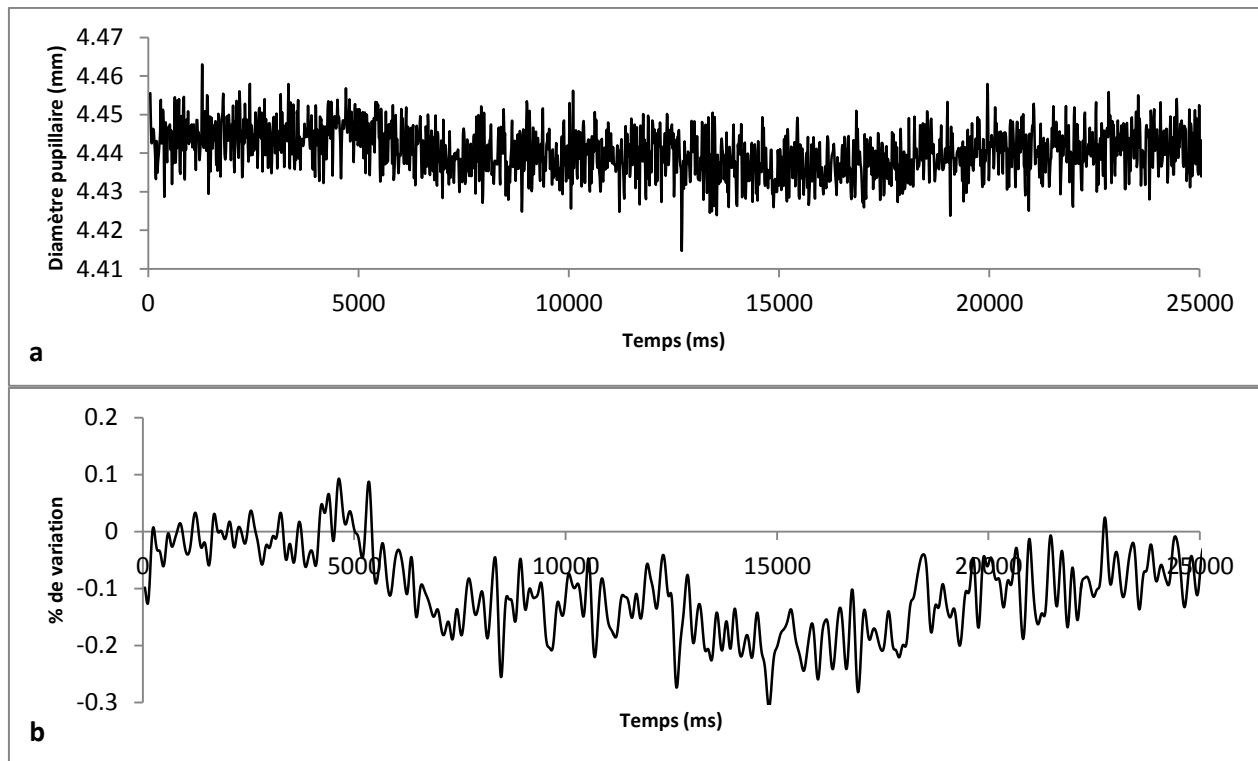


Figure 95. Evolution du diamètre pupillaire moyen mesuré avec un eye-tracker Tobii T60 avec des yeux de verre

(a) données brutes (pas de filtrage, pas de correction)

(b) données corrigées (retrait des 200 premières millisecondes) et filtrées (moyennes mobiles sur 10 points (166,67ms))

Qualité des données

Au cours de nos expérimentations, nous avons rencontré de nombreuses pertes de données. On s'est alors posé la question de savoir si cela ne pouvait pas, tout simplement, venir de l'appareil. A partir des mêmes enregistrements, nous avons alors extrait la qualité des données. Sur les 25s d'enregistrement de chacun des 5 essais, aucune perte de données n'a été observée. Si avec des yeux de verre, aucune perte de données n'est observée, cela signifie que la perte de données observée lors de nos expérimentations est donc due au sujet. Aussi, cela laisse penser qu'avec un sujet complètement immobile, nous ne rencontrerions pas de perte de données. On renforce l'importance de limiter au maximum les mouvements du sujet. Au cours de nos expérimentations, nous avons fait le choix de ne pas utiliser de mentonnière car cela aurait gêné la mise en bouche du produit. Mais, l'observation de ces résultats met en avant qu'il pourrait être préférable d'en utiliser une. Enfin, le sujet ne semble pas être la seule raison des pertes de données puisque, comme nous le rapportons dans le chapitre 3, un changement d'éclairage et d'écran a un impact sur la qualité des données. On en déduit que selon les conditions d'éclairage et d'écran, l'impact des mouvements du sujet sera plus ou moins important.

1.1.2. La reproductibilité

Au cours de nos expérimentations nous avons eu, à deux reprises, l'occasion d'effectuer des études avec des stimuli identiques. Bien que réalisées dans des conditions différentes avec des sujets différents, nous espérions observer des résultats similaires. Or, cela n'a pas été le cas.

Le premier stimulus répété était de la pâte à tartiner. Dans l'expérience 1 du chapitre 5, la mise en bouche de deux pâtes à tartiner, du Nutella et une de marque discount ont conduit respectivement à des dilatations pupillaires de 6,7% et 7,5%. Dans l'expérience 3 de ce même chapitre, les mêmes produits ont été utilisés et ont conduit respectivement à des dilatations pupillaires de 4,4% et 5,6%. Malgré un ordre de grandeur différent en terme d'amplitude de dilatation, on conserve une différence équivalente entre les deux produits, différence qui s'est avérée non significative dans les deux cas. On peut donc imaginer que la différence en terme d'ordre de grandeur vient des sujets. En effet, bien que le calcul d'un pourcentage de variation permette de retirer pas mal de variabilité inter-sujets, il n'en reste pas moins qu'un sujet peut avoir une pupille plus « réactive ». On a effectivement mis en évidence une forte variabilité interindividuelle dans le chapitre 3 (Chapitre 3 - 2.3. Correction de la ligne de base). Cette observation pose la question de la comparaison de données recueillies avec différents sujets.

Dans l'expérience 2 du chapitre 5 et dans l'expérience rapportée dans le chapitre 6, on retrouve également des stimuli répétés. Il s'agit de 6 ambiances sonores : latino, irlandaise, provençale, douche, bureau et voiture. Dans la première expérience rapportée, la dilatation moyenne observée était de 9,1% de variation contre 5,4% dans la seconde. Cependant, de la même manière que précédemment, on retrouve un classement par ordre décroissant de dilatation pupillaire équivalent (Tableau 45) ; dans les 2 expériences les ambiances douche et bureau sont les 2 ambiances entraînant les dilatations pupillaires les plus fortes et les ambiances voiture et provençale, les dilatations pupillaires les plus faibles.

Tableau 45. Tableau récapitulatif des réponses pupillaires aux ambiances (latino, provençale, irlandaise, douche, bureau et voiture) de l'expérience 2 du chapitre 5 et de l'expérience du chapitre 6

Ambiance	Pic de variation observé (%)		Classement par ordre décroissant de dilatation pupillaire	
	Expérience 1 (Chapitre 5 - Expérience 2)	Expérience 2 (Chapitre 6)	Expérience 1 (Chapitre 5 - Expérience 2)	Expérience 2 (Chapitre 6)
Latino	9,0	5,1	3	3-4
Provençale	7,2	3,6	5	6
Irlandaise	7,9	5,1	4	3-4
Douche	14,0	7,4	1	1
Bureau	10,9	6,7	2	2
Voiture	7,0	4,6	6	5

Cette fois-ci, la différence d'ordre de grandeur entre les 2 expériences pourrait s'expliquer par les différences de procédure. Dans la première expérience, les ambiances étaient diffusées seules pendant 1 minute avant d'être arrêtées pour la dégustation du produit. Dans la seconde expérience, elles étaient diffusées 5s avant la présentation d'une odeur puis continuaient à être diffusées jusqu'à la phase de questionnaire. D'ailleurs, nous avons déjà observé que la fin de réaction arrivait beaucoup plus tard

dans la première expérience, la fenêtre de temps avait dû être étendue. Le pic de dilatation se produisait autour de 4s lors de la première expérience alors qu'il se produisait plutôt autour de 1,5s lors de la seconde expérience. Deux hypothèses ont été formulées :

Hypothèse n° 1 : Lors de la première expérimentation, le signal récupéré sur les 10s suivant le début de la stimulation ne correspond pas à la réaction spécifique à l'ambiance. En effet, on peut penser que les premiers instants, le sujet écoutait l'ambiance mais qu'une fois l'ambiance identifiée, il soit « parti dans ses pensées ». On aurait alors confondu une réaction non terminée avec une nouvelle réaction se rajoutant à la première. Aussi les premières secondes correspondraient à la réaction spécifique mais au-delà on mesurerait la charge émotionnelle ou cognitive générée par les pensées du sujet. Ces pensées pourraient être liées à l'ambiance ou non.

Hypothèse n° 2 : Lors de la seconde expérimentation, les 2,5s ne couvraient pas la réaction spécifique à l'ambiance, il aurait fallu, comme dans la première expérimentation, étendre notre fenêtre.

Pour vérifier nos hypothèses, nous avons dans un premier temps récupéré les données moyennes pour les ambiances, sur les 10 secondes étudiées pour la première expérimentation, sur les 5 secondes d'enregistrement pour la seconde expérimentation. La Figure 96 rapporte les courbes d'évolution du pourcentage de variation dans le temps pour les deux expérimentations. L'observation de ces courbes nous permet de rejeter la seconde hypothèse, la réaction spécifique à l'ambiance était bien terminée pour la seconde expérimentation puisque de 2,5s à 5s nous sommes bien sur un retour à la ligne de base. A l'inverse, la première hypothèse semble se vérifier, on observe un nouveau décrochement à 3s qui pourrait correspondre à la « nouvelle réaction ». On observe également une différence de vitesse de réaction, lors de la seconde expérimentation, la réaction est plus rapide. Une nouvelle fois, on peut penser que cela soit dû à la procédure. En effet, dans la première expérimentation l'ambiance était diffusée dès le temps 0 de la bande son alors que lors de la seconde expérimentation, l'ambiance était lancée à 10s du début, l'ambiance était de ce fait, plus rapidement identifiable.

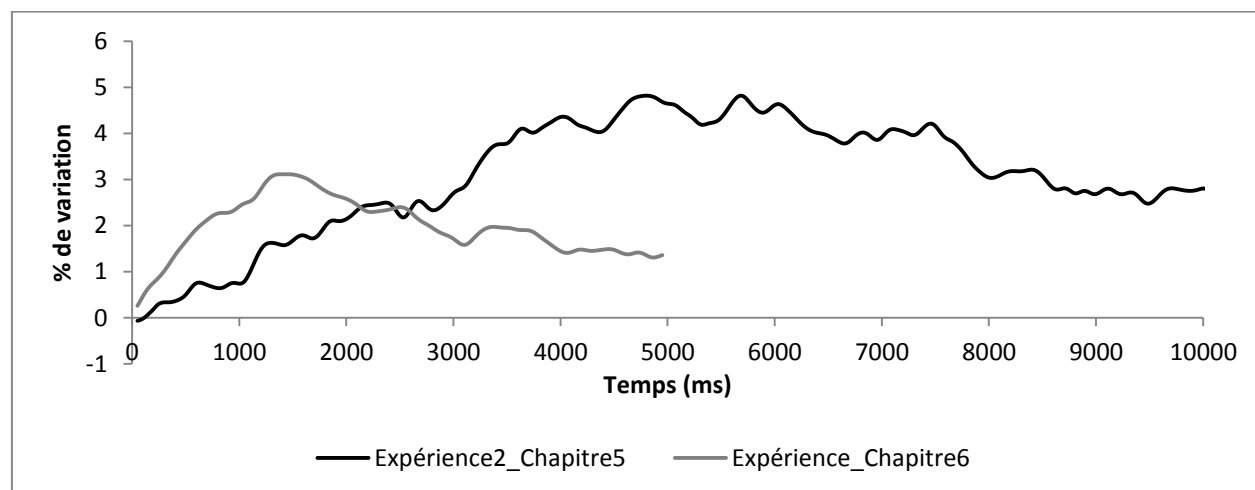


Figure 96. Evolution du pourcentage de variation moyenne du diamètre pupillaire pour les ambiances sonores de l'expérience 2 du chapitre 5 et de l'expérience du chapitre 6

Cependant, cela ne veut pas dire que les résultats de la première expérimentation sont faux mais on ne mesure pas la même chose. En considérant les données de 0 à 2,5s seulement, on mesure la réponse pupillaire lors de l'identification de l'ambiance. En revanche, en considérant une fenêtre plus grande, il est fort probable qu'on mesure les émotions générées par les pensées provoquées par l'ambiance. Cependant, nous ne pouvons pas vraiment être sûrs que le sujet a des pensées relatives à l'ambiance. Aussi, en considérant une fenêtre de 2,5s, on a plus de chance d'être sûr une réaction spécifique à l'ambiance. Finalement, en recalculant les pics de dilatation de la première expérimentation en considérant une fenêtre de 2,5s (Tableau 46) on se rapproche de ceux obtenus lors de la seconde expérimentation sur cette même fenêtre de temps tout en étant légèrement inférieur comme le laissait présager la courbe d'évolution moyenne rapportée Figure 96. Cependant, les résultats ne sont plus autant concordants. L'ambiance douche entraîne toujours une dilatation pupillaire plus forte et l'ambiance voiture toujours une des plus faibles dilatations pupillaires, mais entre les deux, on observe quelques interversions. Enfin, ces observations posent la question de la procédure à mettre en place pour l'enregistrement d'une réponse spécifique à un stimulus auditif. Combien de temps le stimulus auditif doit-il être diffusé seul ? Plutôt 2,5s pour avoir la réaction à l'identification, ou plus afin de connaître les émotions provoquées par ce qu'évoque le stimulus. Contrôler les pensées du sujet est impossible. Ainsi, opter pour la seconde méthode implique de prendre le risque de mesurer des pensées non relatives à l'ambiance. En effet, le sujet arrive peut-être à se détacher de l'ambiance pour la considérer plus comme bruit de fond et pense à des choses qui n'ont pas été évoquées par l'ambiance.

Tableau 46. Réponses pupillaires aux ambiances (latino, provençale, irlandaise, douche, bureau et voiture) de l'expérience 2 du chapitre 5 en considérant une fenêtre de temps de 2,5s

Ambiance	Pic de variation observe (%)	Classement par ordre décroissant de dilatation pupillaire
Latino	3,9	6
Provençale	5,1	3-4
Irlandaise	5,3	2
Douche	6,1	1
Bureau	5,1	3-4
Voiture	4,0	5

1.1.3. Le réalisme

Les contraintes imposées par la pupillométrie (limite des mouvements, pièce privée de la lumière du jour, etc.) placent les conditions de mesure loin d'un cadre réaliste. Or le réalisme est un point clé pour l'étude des émotions. En effet, pour pouvoir approcher ce que le consommateur ressent lors de la consommation d'un produit en situation réelle il faut un cadre contextuel le plus proche possible de cette situation. Celui-ci, déjà difficile à obtenir par des méthodes classiques comme le recueil d'informations déclaratives, l'est encore plus en pupillométrie qui nécessite une maîtrise parfaite de l'environnement. Aussi, il est possible que de la même manière qu'un même produit peut être préféré dans un cadre réaliste plutôt que dans un environnement contrôlé tel qu'un laboratoire (Meiselman et

al., 2000 ; Hersleth et al., 2003 ; Petit & Sieffermann, 2007), certaines émotions aient été refrénées par le manque de représentativité du contexte.

1.1.4. Conclusion

En conclusion, on peut dire que l'utilisation de l'eye-tracker Tobii T60 pour la mesure du diamètre pupillaire permet une **mesure précise**. En effet, avec des yeux de verre nous avons observé une précision de +/-0,19% de variation, or lors de nos expérimentations nous avons observé des pourcentages allant de 3 à 14%, cela représente ainsi de 1 à 6% de notre mesure. En revanche, **la reproductibilité semble sensible en valeur à la fenêtre de temps choisie** pour le traitement des données, **à la procédure et aux sujets**. Ainsi, effectuer des comparaisons au sein d'une même expérimentation avec des procédures similaires et des sujets identiques ne semblent pas poser de problème. En revanche, il faut être vigilant lorsque l'on compare les valeurs obtenues lors d'expérimentations différentes. Enfin, afin de garantir des données fiables (comportant le moins de bruit possible, notamment par rapport à la lumière) et de bonnes qualités (avec le moins de perte de signal possible), des **conditions expérimentales strictes** s'imposent **ce qui nous éloigne d'un cadre de mesure réaliste**. En relatif, des conclusions peuvent ainsi facilement être avancées, mais en valeur, il faut être conscient que certaines émotions ont pu être refrénées. Cependant, nous sommes dans des conditions similaires aux mesures classiques comme le questionnaire.

1.2. La pupillométrie : l'interprétation

La variation de la taille de la pupille est un index involontaire de l'activité du système nerveux autonome (SNA), ce qui représente un avantage important pour nous. Cela signifie que la variation de la taille de la pupille n'est pas contrôlable volontairement et, ainsi, elle indexe l'activité réelle spontanée. Cela fait de la pupillométrie un outil de mesure objectif. Cependant, à cet avantage s'ajoute un inconvénient majeur, l'activité du SNA ne se résume pas aux émotions, bien au contraire. Notamment, la charge cognitive représente une grande partie de l'activité du SNA. D'ailleurs, Stanners et al. (1979) en cherchant à différencier les influences respectives des facteurs émotionnels et cognitifs sur les modifications du diamètre pupillaire, ont noté que lorsque la charge cognitive est constante, les stimuli émotionnels n'ont pas d'influence sur la pupille. Ces stimuli occasionnent une dilatation uniquement lorsque la charge cognitive est au minimum. Plusieurs études ont ainsi essayé d'estimer la part respective des émotions et de la charge cognitive (Kuchinke et al., 2007 ; Vö et al., 2008). Il ressort de ces différentes études que la charge cognitive semble être le facteur le plus influent sur le diamètre pupillaire. Lorsque cette charge est faible, il devient alors possible de voir apparaître les effets plus spécifiquement liés aux émotions. Comment alors savoir, lorsqu'une dilatation pupillaire est observée ce qui est dû à des émotions et ce qui est dû à autre chose ? C'est ce qui sera en partie discuté dans cette nouvelle partie.

1.2.1. La condition contrôle

Pour commencer, il est important de noter que toute stimulation provoque une dilatation. On parle souvent, en anglais, d'« arousal » qui pourrait être traduit par « éveil » (calme, excité). Même dépourvu d'émotions ou de charge cognitive, un stimulus peut provoquer une dilatation pupillaire par le simple fait d'« éveiller » la personne. Ainsi, si toute stimulation provoque une dilatation il apparaît indispensable de choisir une condition contrôle afin de pouvoir établir la signification d'une dilatation pupillaire observée. En effet, sauf si on compare des stimuli équivalents, si on veut à partir d'un stimulus établir si la dilatation pupillaire observée n'est pas comme nous venons de le voir simplement due à l'« arousal », il faut savoir quelle dilatation est provoquée par une stimulation équivalente dépourvue d'émotions ou encore de charge cognitive. Cette situation contrôle doit être choisie fonction du stimulus testé mais ceci n'est pas si simple car définir un stimulus « neutre » reste toujours plus ou moins subjectif. Si on regarde dans la littérature, on retrouve différents types de contrôle ; quelques exemples sont rapportés dans le Tableau 47.

Tableau 47. Exemples de contrôles utilisés dans les études de pupillométrie

Référence	Stimuli testés	Contrôle
Aboyoun et al. (1998)	photos d'hommes et de femmes nu(e)s (excitation sexuelle)	photos d'hommes et de femmes habillé(e)s (pas d'excitation sexuelle)
Barlow (1969)	photos d'hommes politiques	photo d'un inconnu
Bayer et al. (2011)	mots émotionnellement positifs ou négatifs extraits de la liste BAWL-R (Berlin Affective Word List Reloaded, Vo et al., 2009) à faible et haut niveau d'excitation Exemples : Euphorie : positif, haut niveau Sagesse : positif, bas niveau Avalanche : négatif, haut niveau Vide : négatif, bas niveau	mots émotionnellement neutres extraits de la liste BAWL-R à faible et haut niveau d'excitation Exemples : Tempo (haut niveau d'excitation) Mur (faible niveau d'excitation)
Bradley et al. (2008) / Dietz et al. (2011)	images émotionnelles extraites du « International Affective Picture System » (IAPS; Lang, Bradley, & Cuthbert, 2008) négatives (ex : mutilations, animaux menaçants, violence humaine) ou positives (ex : bébés, couples, nourriture, activités sportives)	images neutres extraites du IAPS (ex : bâtiments, scènes de bureau, meubles)
Partala & Surakka (2003)	stimuli auditifs émotionnels positifs et négatifs (ex : rires et pleurs de bébé)	bruits « neutres » (ex : bruit de porte)
Verney et al. (2001)	tâche d'identification (charge cognitive)	tâche d'observation (pas de charge cognitive)

Aussi, beaucoup d'auteurs choisissent de ne pas utiliser de contrôle mais seulement de comparer entre eux, leurs différents stimuli. Si on prend par exemple les études sur la charge cognitive qui sont les plus nombreuses, les comparaisons se font généralement entre des tâches connues pour entraîner des charges cognitives différentes (Beatty, 1982 ; Bradshaw, 1968 ; Causse et al., 2010 ;

Espeseth et al., 2010 ; Hess, 1964 ; Hyona et al., 1995 ; Iqbal et al., 2004 ; Jainta & Baccino, 2010 ; Klingner et al., 2008 ; Piquado et al. 2010 ; Stone et al., 2003) ou entre tâches pour lesquelles on souhaite comparer la charge cognitive entraînée (Beatty, 1982 ; Gabay et al., 2011 ; Hyona et al., 1995 ; Klingner et al., 2008 ; Prehn et al., 2011). Toujours dans l'étude de la charge cognitive, les comparaisons peuvent se faire entre populations comme par exemple avec des individus ayant des capacités cognitives différentes (Beatty, 1982 ; Borneman et al., 2010 ; Ullwer, 2009 ; 2010). Dans ce cas on compare les populations et non les stimuli donc il n'y a pas besoin de contrôle. Cette observation s'étend à d'autres études que celles sur la charge cognitive, dès lors que l'objectif est de discriminer deux stimuli selon un critère cognitif, émotionnel, etc. la mesure du diamètre pupillaire peut être utilisée en comparatif. Cela ne permet cependant pas de conclure sur la valeur de la charge cognitive ou émotionnelle mais sur la différence en terme de charge entre les stimuli comparés.

Dans notre cas, nous avons testé différentes situations contrôles (Figure 97). Notre première idée a été d'utiliser l'eau comme situation contrôle. Même si aucun produit ne peut vraiment être considéré comme complètement neutre, l'eau apparaît tout de même comme un des produits les plus neutres que l'on puisse identifier. Comme nous l'avons rapporté dans le chapitre 4, l'eau entraîne une dilatation pupillaire (Figure 97(a)). L'eau pourrait ainsi être un bon contrôle, la dilatation pupillaire observée lors de sa mise en bouche pourrait correspondre à la dilatation pupillaire due à une stimulation dépourvue d'émotions. Cependant, ce contrôle ne peut être choisi que pour des produits liquides.

Notre seconde idée a été d'utiliser comme contrôle, le **mime de la mise en bouche du**

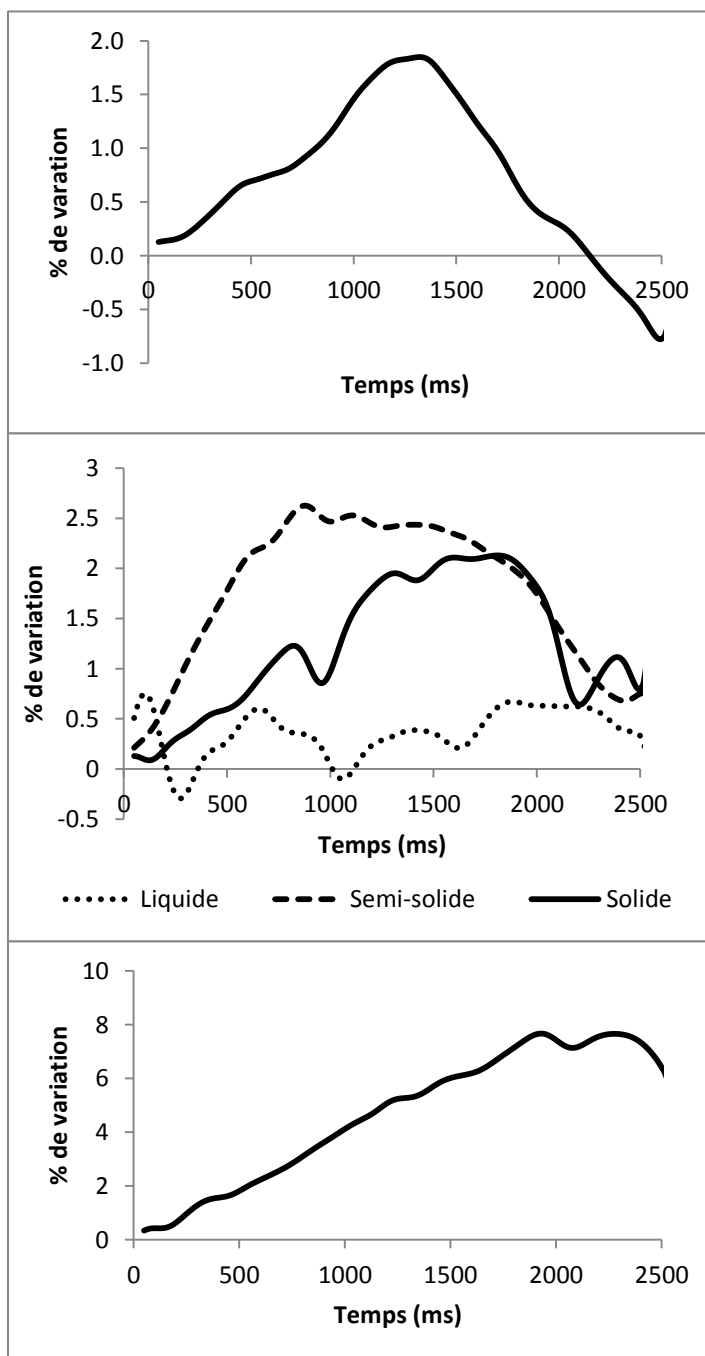


Figure 97. Evolution du diamètre pupillaire pour différents contrôles testés

(a) Gobelet d'eau

(b) Mimes

(c) « Odeur d'eau »

produit. Ceci permettrait de pouvoir adapter la situation contrôle au produit testé. Ce mime consistait à porter un gobelet (mime produit liquide) ou une cuillère (mime produit semi-solide) vide à la bouche ou bien de faire semblant de mettre un produit pris à la main (mime produit solide), en bouche. Cependant, nous ne mesurons plus vraiment la réaction pupillaire à un « produit neutre » mais plutôt l'impact musculaire sur la réponse pupillaire. En effet, la mise en bouche d'un produit exige l'usage de membres pour le sujet, en l'occurrence du bras et de la main ainsi que tous les muscles nécessitant la mise en bouche et l'ingestion. Ces contractions musculaires peuvent avoir un impact sur le diamètre pupillaire. Finalement, l'observation du diamètre pupillaire durant ces mimes a révélé une dilatation pupillaire systématique (Figure 97(b)), excepté peut-être pour le mime du gobelet (produit liquide). Cependant, nous avons constaté que ce mime perturbait les sujets dans le sens où ils avaient par exemple l'impression de « jouer à la dinette ». Dans l'expérience 2 du chapitre 3, nous avons mis en place ce contrôle et les sujets avaient tendance à faire des remarques comme par exemple « humm... c'est délicieux » en mettant la cuillère vide en bouche. Ne pouvant affirmer que cette dilatation pupillaire n'était pas due à cette perturbation, et de plus, n'ayant qu'un contrôle partiel (contrôle muscle mais pas produit neutre), nous avons fait le choix de ne pas garder cette situation contrôle.

Plus tard, lors de notre dernière expérimentation, comme nous l'avons rapporté dans le dernier chapitre, nous avons pour des stimuli olfactifs, choisi l' « **odeur de l'eau** » en contrôle. Une nouvelle fois, ceci a perturbé les sujets, d'autant plus qu'ils avaient comme consigne de répondre à la question « Aimez-vous cette odeur ? ». La mouillette n'étant le support d'aucune odeur, ceux-ci étaient surpris et « cherchaient » à identifier l'odeur. Ceci s'est traduit par une dilatation pupillaire équivalente à celle observée pour les odeurs (Figure 97(c)).

Finalement, pour les produits liquides, nous nous sommes rapportés à la dilatation pupillaire moyenne observée pour l'eau au cours de l'expérimentation rapportée dans le chapitre 4. En revanche, pour les autres contrôles, ne pouvant vraiment être sûr de ce que l'on mesure (surprise, amusement, etc.), nous avons fait le choix de ne pas les conserver. De plus, tous les stimuli ont été systématiquement comparés au silence, excepté pour les premières expérimentations. Ceci ne permet pas de mesurer la réaction à un produit équivalent, neutre, mais au moins de pouvoir comparer la réponse pupillaire aux variations naturelles de la pupille. Enfin, les stimuli équivalents ont été comparés entre eux.

1.2.2. Le couplage au déclaratif

Selon certaines théories psychologiques des émotions, deux variables principales entrent en jeu : la valence émotionnelle (agréable, désagréable) et « l'arousal » ou comme nous l'avons déjà mentionné, « l'alerte qui stimule l'éveil » en français (calme, excité). Les contributions relatives de ces 2 variables d'une part et de la charge cognitive d'autre part sur le diamètre pupillaire ne sont pas encore très bien connues. Janisse (1974) observe une relation curvilinéaire entre la valence émotionnelle et le diamètre pupillaire (dilatation élevée pour les stimuli à valence positive et négative, et faible pour les stimuli à valence neutre) et linéaire entre les variations pupillaires et l'arousal (la dilatation augmente progressivement au fur et à mesure que l'excitation augmente) mais valence et excitation n'ont pas été mesurées séparément dans cette étude ce qui a été réalisé plus tard par Partala & Surakka (2003). Ils ont montré, dans la modalité auditive, que la dilatation pupillaire est plus importante pour des stimuli à forte

excitation et à valence positive ou négative, par rapport à des stimuli neutres. Il apparaît ainsi difficile de qualifier les émotions mesurées au travers du diamètre pupillaire. Nous ne pouvons, d'une part, pas affirmer que les émotions mesurées sont positives ou négatives et d'autre part, même si la valence des émotions est mesurée elles ne sont pas pour autant qualifiées. Par exemple, si le sujet ressent des émotions positives, s'agit-il de joie, d'excitation, pour cela seul le déclaratif peut vraiment nous informer.

Nous avons, dans les deux dernières expérimentations, couplé notre mesure pupillaire à un questionnaire. Le sujet devait, à l'aide de ce questionnaire, évaluer son état émotionnel. Pour cela il notait le ressenti de 8 items d'émotions, sur une échelle en 5 points allant de « pas du tout » à « extrêmement ». Ces 8 items correspondaient aux 8 émotions primaires : attirance, colère, dégoût, excitation, joie, peur, surprise et tristesse (Plutchik, 2001). Ce questionnaire, couplé aux données pupillométriques, permet de rendre les résultats plus informatifs. Le Tableau 48 récapitule les résultats de mesure des émotions obtenus par réponse pupillaire et par questionnaire lors de ces deux expérimentations. Nous remarquons que nous discriminons plus facilement les stimuli par questionnaire que par réponse pupillaire. Ceci s'explique facilement. En effet, pour les questionnaires, nous avons fait le choix de retirer les valeurs de l'état émotionnel initial (questionnaire rempli au début du test) pour avoir une mesure relative à l'état émotionnel de départ du sujet. De ce fait, on met en évidence l'augmentation ou la diminution du ressenti des émotions. Au contraire, avec la réponse pupillaire, on mesure la charge émotionnelle, qu'elle soit positive ou négative. Ce sont alors deux mesures différentes. Globalement, la majorité de nos stimuli augmentait et diminuait le ressenti d'émotions, la charge émotionnelle pouvait ainsi être la même en terme de quantité alors qu'elle n'est pas de même qualité. Ceci peut ainsi expliquer pourquoi les stimuli sont difficilement discriminés au travers de la pupille. La valence des émotions varie, ce qui nous permet la discrimination par questionnaire mais l'« arousal » est peut-être équivalent. Ceci irait dans le sens que la pupille ne mesure finalement que l'« arousal ».

Tableau 48. Récapitulatif des résultats de mesure des émotions obtenus par réponse pupillaire et par questionnaire

	Réponse pupillaire		Réponse questionnaire	
	Pic de dilatation pupillaire	Discrimination	Réponse	Discrimination
Chapitre5 (Exp3) Produits	Pâte à tartiner : 4,4% Jus d'orange : 3,8% Gâteau : 3,0%	Non	<u>Pâte à tartiner</u> : ↑ Attirance et surprise ↓ Colère, Joie, Peur et Tristesse <u>Jus d'orange et gâteau</u> : ↑ Surprise ↓ Colère, Joie, Peur	<u>Attirance</u> : Pâte > Jus d'orange
Chapitre5 (Exp3) Musiques	Musique appréciée (M+) : 7,0% Musique non appréciée (M-) : 6,4%	Non	<u>Musique appréciée</u> : ↑ Attirance, excitation, joie, surprise et tristesse ↓ Colère et dégoût <u>Musique non appréciée</u> : ↑ Colère et dégoût ↓ Attirance, excitation et joie	<u>Emotions « positives »</u> (Attirance, excitation, joie et surprise) : M+ > M- <u>Colère et Dégoût</u> : M- > M+
Chapitre6 Odeurs	Mojito : 8,9% Pastis : 8,3% Whisky : 8,6%	Non	Mojito ↑ Attirance, surprise et tristesse Pastis ↑ Attirance et dégoût ↓ Colère Whisky ↑ Colère, dégoût et tristesse Attirance, excitation, joie ↓	<u>Emotions « positives »</u> (Attirance, excitation, joie): Mojito, Pastis > Whisky <u>Colère et Dégoût</u> : Whisky > Mojito, Pastis <u>Tristesse</u> : Mojito, Whisky > Pastis
Chapitre6 Ambiances	Latino : 5,1% Provençale : 3,6% Irlandaise : 5,1% → Ambiance congruentes : 3,6% Bureau : 6,7% Douche : 7,4% Voiture : 4,6% → Ambiance congruentes : 5,2%	Douche > Provençale et voiture Bureau > Provençale Ambiances non congruentes > Ambiances congruentes (tendance)	Ambiances non congruentes : ↑ Dégoût, surprise et tristesse ↓ Excitation, joie Ambiances congruentes ↑ Dégoût et surprise	<u>Excitation et joie</u> : C+ > C-

Cependant, comme nous le mentionnions en introduction, le questionnaire est une mesure subjective et limitée car les sujets ont du mal à identifier, rationaliser et exprimer leurs émotions. Il est difficile d'ignorer le fait que les sujets ont très probablement noté leurs émotions par rapport à leurs préférences. On demande au sujet d'être rationnel et pour cela il ne peut faire abstraction du produit qu'il déguste, de l'odeur qu'il sent ou du son qu'il écoute afin de produire des informations cohérentes et logiques. En effet, dans la première expérience utilisant un questionnaire d'émotions on observe que

les produits ne sont émotionnellement discriminés que sur l'attrance, consécutivement au produit préféré (la pâte à tartiner) les sujets notent plus fortement l'attrance que consécutivement aux deux autres produits. De plus, pour la musique, consécutivement à la musique appréciée les sujets notent plus fortement les émotions positives et plus faiblement les émotions négatives et inversement consécutivement à la musique non appréciée. Dans l'expérience sur les stimuli olfactifs, on observe que consécutivement à l'odeur la moins appréciée, voire non appréciée (l'odeur de whisky), les sujets notent plus fortement les émotions négatives et consécutivement aux odeurs appréciées (les odeurs de mojito et pastis) les sujets notent plus fortement les émotions positives. Pour les ambiances, ressorties comme moins émotionnelles, ces observations sont moins marquées. On constate ainsi que globalement, les émotions positives sont surévaluées consécutivement à un stimulus apprécié alors que ce sont les émotions négatives qui sont surévaluées consécutivement à un stimulus qui n'est pas apprécié.

Il n'en reste pas moins intéressant l'observation des cartes factorielles issues de l'ACP des données émotions. En effet, la première, de l'expérience 3 rapportée dans le chapitre 5 montre que les musiques sont plus émotionnelles que les produits ; les produits sont regroupés au centre de la carte tandis que les musiques ont de fortes coordonnées sur le premier axe. De manière opposée, la carte factorielle de l'expérience rapportée dans le chapitre 6 montre cette fois-ci que les odeurs sont plus émotionnelles que les ambiances ; pareillement, les ambiances sont regroupées au centre de la carte tandis que les odeurs ont de fortes coordonnées sur le premier axe. Parallèlement, en pupillométrie, nous avons mis en avant une plus forte dilatation pupillaire pour les musiques et les odeurs que pour les ambiances et les produits. Finalement, ces données coïncident bien.

En conclusion, le couplage des mesures pupillométriques au questionnaire sur l'état émotionnel a permis d'émettre une hypothèse quant à la difficulté en pupillométrie à discriminer des stimuli proches. Cela pourrait venir de l'absence de qualification. En ne mesurant que l'« arousal », on perd en pouvoir discriminant. Le couplage pupillométrie et questionnaire d'émotions est intéressant. La pupillométrie apporte aux questionnaires une quantification globale et objective des émotions pendant que le questionnaire apporte la qualification des émotions responsables de la charge émotionnelle mesurée par pupillométrie. Cependant, tout comme en pupillométrie, nous ne sommes pas sûrs d'exclusivement mesurer les émotions, avec un questionnaire, nous ne sommes pas sûrs de ne pas avoir l'influence des préférences.

1.2.3. Le couplage à d'autres mesures

Les émotions ne font pas qu'entraîner une dilatation pupillaire. En effet, elles modifient également d'autres paramètres physiologiques comme le rythme cardiaque, la réponse électrodermale, etc. Aussi, comme nous l'avons rapporté dans le premier chapitre, elles entraînent des modifications comportementales et neurologiques. Coupler au moins une de ces mesures à la mesure du diamètre pupillaire pourrait permettre d'obtenir des résultats plus précis. Par exemple, en couplant à l'électromyographie, sensible aux émotions spécifiques (Surakka & Hietanen, 1998), on pourrait, lorsqu'une dilatation pupillaire est observée, vérifier que nous sommes bien en présence d'émotion(s) et la/les qualifier. Inversement, on pourrait « nettoyer » les données électromyographiques en excluant les réactions faciales qui ne s'accompagnent pas d'une dilatation pupillaire. Autre exemple, en couplant à

une ou plusieurs mesure(s) physiologique(s) (ex : réponse électrodermale), on pourrait plus facilement éliminer ce qui est du bruit de ce qui est réellement significatif.

1.2.4. Conclusion

La pupillométrie permet la **mesure objective des émotions**, mais parce qu'il n'y a pas que les émotions qui entraînent une dilatation pupillaire, il faut **rester vigilant quant à l'interprétation des réponses pupillaires**. Afin de savoir ce que l'on mesure il est nécessaire, soit de **comparer des stimuli similaires**, soit de **choisir une situation contrôle** si on souhaite conclure sur le pouvoir émotionnel du stimulus sans être en comparatif. Des **couplages** peuvent permettre d'affiner l'interprétation comme le couplage à des mesures subjectives (ex : questionnaire d'émotions) ou le couplage à d'autres mesures physiologiques ou comportementales.

1.3. Pouvoir émotionnel et influence des émotions

1.3.1. Le pouvoir émotionnel des différents éléments du contexte alimentaire


Nous avons, dans notre problématique, rapporté quatre principales hypothèses théoriques, principalement basées sur le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002). Nous proposons dans ce point de discuter ces hypothèses.

Hypothèse n°1 : La présentation d'un stimulus gustatif à un sujet qui l'a déjà rencontré, active, entre autres, les dimensions émotionnelles associées à ce stimulus ; la charge émotionnelle activée est retranscrite par le diamètre pupillaire qui permet de discriminer les stimuli gustatifs sur leur pouvoir émotionnel

Le Tableau 49 rapporte les résultats obtenus et présentés dans le chapitre 5 pour tous les stimuli gustatifs testés.

Tableau 49. Tableau récapitulatif des résultats obtenus avec des stimuli gustatifs rapportés dans le chapitre 5 (3 expériences)

	Stimulus	Différent du silence ?	Différents entre eux ?	Pic de variation (%)
Expérience 1	Sirop1	--	Non	9,1
	Sirop2	--		15,1
	Sirop3	--		13,3
	Compote1	--	Non	3,3
	Compote2	--		3,4
	Compote3	--		4,6
	Pate1	--	Non	6,7
	Pate2	--		7,5
Expérience 2	Bière	--	Non	9,0
	Mojito	--		6,9
	Pastis	--		8,0
	Whisky	--		7,0
Expérience 3	Gateau1	Oui	Non	3,0
	Gateau2	Oui		
	Jus1	Oui	Non	3,8
	Jus2	Oui		
	Pate1	Oui	Non	4,4
	Pate2	Oui		

 Valeur supérieure au contrôle choisi

On a pu remarquer que tous les produits entraînaient une dilatation pupillaire. Cependant, comme nous l'exposons dans le point précédent, toute stimulation, même dépourvue de charge émotionnelle peut entraîner une dilatation pupillaire. Afin de pouvoir rendre compte de la signification des dilatations observées pour ces produits, en plus de les comparer au silence (qui a permis de conclure à une dilatation pupillaire significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille), nous les avons rapportées (1) à la dilatation entraînée par l'eau pour les produits sans artéfact (3,8% de variation moyenne), (2) à la dilatation entraînée par une solution sucrée à 10g.L⁻¹ (concentration moyenne des sirops de fraise à l'eau) enregistrée avec artéfact pour les sirops (10,4% de variation moyenne) et enfin (3) aux dilatations entraînées par les différentes solutions hydroalcooliques pour les boissons alcoolisées (Chapitre 4 - Tableau 31). Dans le tableau précédent, les chiffres en gras et avec un fond de case vert sont ceux supérieurs au contrôle choisi. Plus de la moitié des produits entraînent une dilatation pupillaire plus faible que leur contrôle, ceci confirme le faible pouvoir émotionnel des produits. De plus, dans la majorité des expérimentations, les produits n'ont pu être discriminés. On peut supposer que (1) il y a trop peu de charge émotionnelle pour voir des différences ou (2), la charge émotionnelle est équivalente pour les différents produits. L'hypothèse n'est ainsi que partiellement vérifiée. En effet, il semblerait y avoir des cas où la charge émotionnelle est retranscrite par le diamètre pupillaire, ce qui vient confirmer l'activation d'états émotionnels comme stipulé dans le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002). En revanche, il est difficile de discriminer des produits sur leur pouvoir émotionnel.

***Hypothèse n°2 :** La présentation d'un stimulus olfactif, par l'activation de toutes les dimensions sensorielles, motrices et émotionnelles associées au stimulus entraîne soit (1) la même réponse que le stimulus gustatif associé, soit (2) une réponse pupillaire plus forte traduisant un meilleur accès aux souvenirs autobiographiques au travers de la modalité olfactive*

Au cours de nos expérimentations, 3 produits ont été testés en 2 modalités : le mojito, le pastis et le whisky. Ils ont dans un premier temps été testé en modalité gustative puis en modalité olfactive. Cependant, en modalité gustative, ils font partie des produits sujets à l'artéfact de la lumière. Comme on peut le voir dans le Tableau 49 il semblerait que le pic de variation soit surestimé avec la méthode adaptée de Dietz et al. (2011), puisque tous les pics observés pour ces produits étaient supérieurs à ceux observés pour les produits sans artéfact. Le même phénomène a été observé pour les solutions aqueuses et hydro-alcooliques testées avec l'artéfact et choisies comme contrôles. Nous allons tout de même comparer les résultats. Le Tableau 50 rapporte les réponses aux stimuli mojito, pastis et whisky présentés en modalité gustative ou olfactive. Malgré le fait que le pic de dilatation de la modalité gustative est potentiellement surestimé, on observe un pic de variation supérieur pour la modalité olfactive. **Ceci vient confirmer les données de la littérature montrant que les stimuli olfactifs réactivent plus efficacement les souvenirs autobiographiques que les autres modalités sensorielles (Chu & Downes, 2000). Ainsi on valide la seconde partie de l'hypothèse.** La première partie ne semble pas se vérifier. Un stimulus de modalité gustatif, même s'il active toutes les modalités sensorielles associées au stimulus donné, ne remplace pas l'efficacité d'accès aux souvenirs de la modalité olfactive.

Tableau 50. Réponses pupillaires aux stimuli mojito, pastis et whisky présentés en modalité gustative ou olfactive

Modalité	Stimulus	Pic de variation (%)	
Gustative	Mojito	6,9	7,3
	Pastis	8,0	
	Whisky	7,0	
Olfactive	Mojito	8,9	8,6
	Pastis	8,3	
	Whisky	8,6	

***Hypothèse n°3 :** La diffusion d'un stimulus auditif personnel (quelque chose de connu par le sujet, rattaché à des souvenirs) entraîne plus d'émotions qu'un stimulus auditif impersonnel (pouvant être reconnu par le sujet mais pas nécessairement rattaché à des souvenirs) et ceci est retranscrit par la réponse pupillaire*

Pour tester cette hypothèse, deux types de stimulus auditifs ont été utilisés : des ambiances sonores construites de manière à être évocatrices pour tous mais ne reflétant pas nécessairement les expériences personnelles et des musiques appréciées et non appréciées choisies pour chaque sujet selon ses propres goûts. Pour les ambiances, nous avons plusieurs valeurs de dilatation pupillaire pour chacune d'entre elles en fonction du choix de traitement et de l'expérience mais finalement, les valeurs les plus comparables car calculées de manière similaire à celles des musiques, sont celles du dernier chapitre. Le Tableau 51 rappelle les réponses pupillaires observées pour les différentes ambiances lors de l'expérience rapportée dans le chapitre 6 et les différentes musiques lors de l'expérience 3 du chapitre 5. En moyenne on observe une dilatation pour les ambiances de 5,4% et pour les musiques de 6,7%. Ceci vient tout d'abord confirmer l'activation d'états émotionnels comme stipulé dans le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002) et également semble confirmer l'hypothèse mentionnée ci-dessus. Deux

ambiances ont fait au moins autant dilater que les musiques, il s'agit des ambiances douche (7,4%) et bureau (6,7%). Si l'hypothèse formée est correcte, cela signifierait que les ambiances douche et bureau rappellent plus de souvenirs personnels émotionnels que les autres ambiances. Pour l'ambiance douche, effectivement, cela semble être une ambiance reconnaissable par tous mais aussi, rappelant des souvenirs à tous. Pour l'ambiance bureau, c'est moins évident, tout le monde ne travaille pas en bureau. Cependant, cela est plausible. Autre hypothèse possible pour le bureau, cela génère peut-être du stress chez certaines personnes, le stress entraînant lui aussi une dilatation pupillaire, ceci expliquerait les résultats observés.

Tableau 51. Récapitulatif des réponses pupillaires durant l'écoute des ambiances et des musiques

Type de stimulus auditif	Stimulus	Pic de variation (%)	
Impersonnel	Ambiance latino	5,1	Moyenne ambiances : 5,4%
	Ambiance provençale	3,6	
	Ambiance irlandaise	5,1	
	Ambiance douche	7,4	
	Ambiance bureau	6,7	
	Ambiance voiture	4,6	
Personnel	Musique appréciée	7,0	Moyenne musiques : 6,7%
	Musique non appréciée	6,4	

Hypothèse n°4 : La présentation simultanée de stimuli de différentes modalités entraîne une plus forte charge émotionnelle qu'un stimulus seul

Nous avons tenté de vérifier cette hypothèse au travers de l'observation des résultats de deux présentations simultanées : stimulus gustatif + stimulus auditif (musique) et stimulus olfactif + stimulus auditif (ambiance). Le Tableau 52 rapporte les résultats de la comparaison pour chacun des types de stimulus étudiés des différentes conditions : seul, avec musique appréciée ou avec musique non appréciée pour les stimuli gustatifs et seul, avec ambiance congruente ou avec ambiance non congruente pour les stimuli olfactifs. Au vu de ces résultats il semblerait que l'hypothèse soit rejetée, en effet, on observe l'inverse dans 3 cas sur 4. Cependant, (1) les différences ne se sont pas avérées significatives et (2) la procédure afin de tester ces effets était probablement mal choisie. En effet, pour expliquer ce second point, dans les deux cas, l'enregistrement de la réponse pupillaire aux stimuli gustatifs ou olfactifs avec musique ou ambiance était réalisé alors que la musique et l'ambiance étaient déjà diffusées depuis quelques secondes. Or, pour réellement vérifier cette hypothèse, il aurait fallu, lancer les deux stimuli en simultané avec bien sûr en contrôle, l'enregistrement de la réponse pupillaire pour chacun des stimuli présenté seul.

Tableau 52. Comparaison pour chacun des types de stimulus étudiés des différentes conditions

	Pic de dilatation (%)			
	Seul	Avec stimulus auditif		
		Musique appréciée	Musique non appréciée	Ambiance congruente / Ambiance non congruente
Stimuli gustatifs	3,0	3,0	2,2	
Stimuli olfactifs	8,5			7,4 / 7,9

Code couleur : Noir - dilatation équivalente / Rouge - dilatation plus faible

Enfin, l'objectif principal était de répondre à la question « **Dans le contexte alimentaire, quel est le pouvoir émotionnel du produit, du contexte/de l'ambiance et de ces deux éléments combinés ?** »

Pour répondre à cette question, les pics de dilatation ont été moyennés par type de stimulus (les données recueillies avec l'artéfact ont été exclues) et sont rapportés dans le Tableau 53.

Tableau 53. Pics de dilatation moyens obtenus pour les différents types de stimulus

Modalités	Stimuli testés	Pic de dilatation moyen (% de variation)
Gustative	Pâte à tartiner (2 fois), compote de pomme, jus d'orange, gâteau à la framboise	4,6%
Auditive	Ambiances : latino, irlandaise, provençale, douche, bureau et voiture (chacune 2 fois) et lounge et usine (chacune 1 fois) Musique : musiques appréciées et musiques non appréciée	6,6%
Olfactive	Mojito, pastis et whisky	8,6%

A première vue il semblerait que les produits alimentaires ingérés aient, parmi les éléments étudiés, le pouvoir émotionnel le plus faible, les stimuli olfactifs auraient le pouvoir émotionnel le plus fort et les stimuli auditifs seraient intermédiaires. Cependant, quelques nuances peuvent être apportées. En effet, au sein de la modalité auditive, des différences ont pu être observées. Pour les ambiances, lors de la première expérience, une dilatation pupillaire moyenne de 9,2% a été observée lors de la considération d'une fenêtre de temps de 10s et de 4,9% en considérant une fenêtre de temps de 2,5s. Toujours pour les ambiances, lors de la seconde expérience, une dilatation pupillaire moyenne de 5,4% a été observée. Enfin, pour les musiques, une dilatation pupillaire moyenne de 6,7% a été observée. La classification précédemment mentionnée se confirme donc lorsque les stimuli auditifs sont des musiques. En revanche, les ambiances semblent moins émotionnelles puisqu'on a dit que lors de la considération d'une fenêtre de 10s il était fort probable qu'on mesure une réaction autre que la réaction spécifique à l'ambiance. Le classement serait finalement :

Produits < Ambiances < Musiques < Odeurs

1.3.2. L'impact sur notre perception hédonique

Ainsi nous avons vu que les ambiances et les musiques entraînaient des émotions. Ce qui nous intéresse de savoir maintenant c'est dans quelle mesure elles interviennent dans notre perception hédonique. Pour cela, nous avons repris les résultats des deux dernières expériences. Ils ont montré que

(1) lors de la diffusion de musiques aimées, le sujet surévaluait le produit qu'il consommait et (2) lors de la diffusion d'ambiances congruentes ou non congruentes, il n'y avait pas d'impact sur la notation hédonique des odeurs. Ceci va dans le sens des précédentes observations qui indiquaient que les musiques étaient plus émotionnelles que les ambiances. Ainsi, il est probable que les émotions provoquées par les ambiances n'aient pas été suffisamment fortes pour influencer la perception hédonique du sujet. Cependant, même si les ambiances entraînent moins d'émotions que les musiques, nous nous attendions à ce que la congruence influence l'appréciation avec une appréciation plus élevée lors des associations congruentes et une appréciation moins élevée lors des associations non congruentes (Schifferstein & Verlegh, 1996 ; Seo et al., 2009 ; Seo & Hummel, 2011). Ces derniers résultats ne vont ainsi pas dans le sens de la littérature. Cependant, on peut imaginer qu'avec un effectif plus important, l'effet serait apparu puisque nous avons bien l'ordre attendu (ambiances non congruentes : 5,3 ; silence : 5,5 ; ambiances congruentes : 5,7). Enfin, nous avons également observé que les ambiances congruentes et non congruentes n'influençaient pas le temps de réponse à la question « Aimez-vous cette odeur ? ». Ceci s'explique par le fait que celui-ci est principalement conduit par l'appréciation hédonique, et les ambiances n'influençant pas l'appréciation hédonique, indirectement, n'influencent pas ce temps de réponse.

1.3.3. Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire que les différents éléments du contexte ne semblent pas avoir le même pouvoir émotionnel. Voici le classement que nous avons pu établir à partir des stimuli testés :

Produits < Ambiances < Musiques < Odeurs

Aussi, ce qui va surtout impacter notre perception hédonique au travers des émotions est la musique. Mais finalement, on pourrait étendre à tout stimulus auditif rappelant des souvenirs. En effet, ce qui a principalement été mis en évidence comme différence entre les ambiances et la musique est l'aspect affectif, la musique « parlait » plus au sujet, lui rappelait plus de souvenirs.

2. Perspectives de ce travail de thèse

Au travers de quatre expérimentations, nous avons apporté des preuves scientifiques montrant que :

- (1) les différents éléments du contexte alimentaire avaient des pouvoirs émotionnels différents, notamment les odeurs sont de forts vecteurs émotionnels tout comme les stimuli auditifs lorsqu'ils affectent directement le sujet,
- (2) la préférence n'est pas l'unique déterminant des émotions,
- (3) les émotions peuvent impacter l'appréciation hédonique et la réponse pupillaire pourrait être un moyen de le prédire.

L'ensemble des résultats obtenus au travers de ces quatre expérimentations vient appuyer l'idée que tout stimulus, au travers de l'activation des traces multidimensionnelles (Versace, Nevers & Padovan, 2002) va entraîner des émotions positives ou négatives par le rappel d'expériences associées à des états du corps plus ou moins agréables et désagréables. Ces émotions impactent nos préférences.

Dans cette partie, nous proposons des perspectives pour aller au-delà de ces travaux de thèse, et qui pourraient constituer de futurs projets de recherche.

2.1. Méthodologie

Nous avons au cours de ces travaux de thèse, réussi à mettre en place une méthodologie solide. Cependant, la discussion nous a permis de soulever quelques petits problèmes persistants concernant la qualité des données, la reproductibilité et le réalisme. Voici ci-dessous des propositions pour améliorer l'outil.

2.1.1. Des conditions expérimentales extrapolables

La première chose qu'il serait impératif de faire est une définition extrapolable des conditions expérimentales à tout lieu. Nous avons pu constater que malgré l'utilisation d'un appareil capable de mesurer un signal en continu sans perte de données sur œil de verre, la transposition à l'œil humain peut, selon la lumière utilisée, conduire à des pertes de données importantes, en tout cas avec l'appareil utilisé (Tobii T60). La luminosité ne semble pas l'unique paramètre à définir pour une bonne qualité de données. En effet, à luminosité équivalente mais type d'éclairage différent, la qualité des données peut varier. Ainsi, il serait intéressant de tester une batterie d'éclairages (plafonnier, spot, halogène, etc.) à différentes luminosités (de 0 à 500 lux par exemple) et dans différentes configurations (disposés dans différents endroits de la pièce). Cela permettrait de tirer des conclusions plus précises quant aux facteurs susceptibles d'impacter la qualité des données. Nous aurions ainsi plus de chance d'avoir des recommandations extrapolables.

2.1.2. Mieux appréhender la reproductibilité

Egalement, nous avons vu que la reproductibilité semble sensible en valeur à la fenêtre de temps choisie pour le traitement des données, à la procédure et aux sujets. Pour la fenêtre de temps et la procédure, celles-ci doivent être choisies en fonction de ce que l'expérimentateur souhaite mesurer. En revanche, pour les sujets et les conditions expérimentales, il serait intéressant de répondre aux questions suivantes : « Les données recueillies à partir de différents sujets sont-elles comparables ? » et « Les données recueillies dans différentes conditions expérimentales sont-elles comparables ? ».

Pour répondre à ces questions sans nécessité d'un jeu de données trop conséquent, on pourrait s'inspirer des méthodes de bootstrap (méthodes d'inférence statistique utilisant le rééchantillonnage afin de définir notamment la dispersion et l'intervalle de confiance). Pour cela il faudrait avoir la réponse pupillaire à un ou plusieurs stimulus(i) dans différentes conditions expérimentales mais avec les mêmes sujets. A partir de ces données on effectuerait n tirages aléatoires de sujets, k fois, avec remise parmi la matrice de chaque stimulus, dans chaque condition (Figure 98). Par stimulus, on pourrait alors comparer l'ensemble des matrices entre elles à partir des pics de dilatation et/ou par comparaison temps par temps grâce à des analyses de variance à 3 facteurs, sujet, observation et condition. Pour répondre à la première question, nous nous intéresserions au facteur observation. En effet, on ne veut pas savoir s'il

existe un effet sujet (il sera probablement existant) mais s'il y a un effet observation qui pourrait nous indiquer que la réponse pupillaire à un stimulus dépend des sujets choisis. Si l'effet observation n'est pas significatif alors c'est que les données recueillies à partir de différents sujets sont comparables entre elles, en revanche, s'il est significatif alors cela indique que nos observations dépendent des sujets. Ainsi, il faut comparer les données de stimuli recueillies à partir des mêmes sujets (ce que l'on a fait par précaution). Pour la seconde question nous nous intéresserions au facteur condition afin de savoir si la réponse pupillaire à un stimulus dépend des conditions expérimentales. Si l'effet condition n'est pas significatif alors c'est que les données recueillies dans différentes conditions sont comparables entre elles, en revanche, s'il est significatif alors cela met en évidence que nos observations dépendent des conditions expérimentales. Ainsi, cela signifie que les données ne peuvent être comparées d'une étude à l'autre si réalisées dans des conditions expérimentales différentes. D'ailleurs il est probable que ça soit le cas car on peut imaginer qu'une pupille sera plus ou moins réactive selon la luminosité ambiante par exemple.

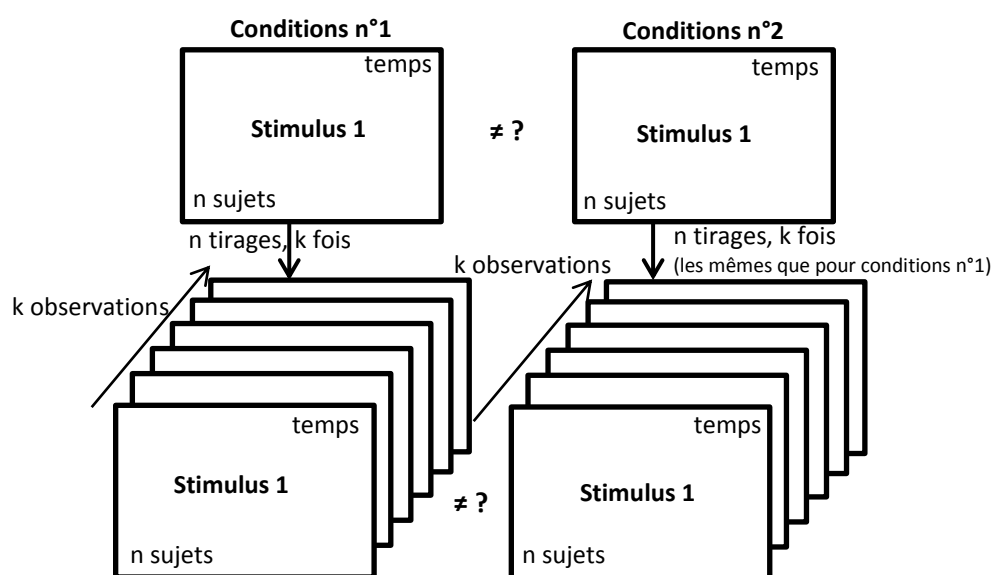


Figure 98. Méthode pour répondre aux questions : « Les données recueillies à partir de différents sujets sont-elles comparables ? » et « Les données recueillies dans différentes conditions sont-elles comparables ? »

2.1.3. Assouplir les conditions expérimentales

Enfin, nous l'avons vu, la pupillométrie impose des conditions expérimentales strictes qui nous éloignent d'un cadre de mesure réaliste. Des travaux pourraient être conduits afin de définir des assouplissements des conditions expérimentales tout en gardant la maîtrise de la mesure. Ceci permettrait certainement de mieux appréhender les émotions. Par exemple, les études immersives pourraient être envisagées (Hein et al., 2010, 2012; Hersleth et al., 2003; Jakesch et al., 2011; King et al., 2004; Koenigs et al., 2007; Köster, 2003; Petit & Sieffermann, 2007; Sester et al., 2013; Werle et al., 2011; Wilson-Mendenhall et al., 2011; Wirtz et al., 2007). L'immersion consiste à évoquer une situation

alimentaire dans un laboratoire donc à apporter des éléments contextuels dans un environnement contrôlé.

2.2. L'interprétation

2.2.1. La condition contrôle

Au cours de la discussion, nous avons mis en avant différents points indispensables à la bonne interprétation des données pupillométriques. Notamment, nous avons souligné l'importance d'une condition contrôle afin de pouvoir interpréter la signification d'une réponse pupillaire seule. Si j'observe une dilatation pupillaire de 10%, quelle est la part due à la stimulation en tant que telle et celle due à la charge émotionnelle ou cognitive ? Nos tentatives pour établir un contrôle fiable n'ont pas été très fructueuses. Hormis les données obtenues avec l'eau et celles obtenues avec les solutions aqueuses et hydro-alcooliques qui semblent être de bons éléments comparatifs, nous n'avons pas réussi à réellement établir un contrôle qui pourrait être mesuré pour chaque sujet au cours de l'expérimentation et conduire à des interprétations fiables. Pourtant, cela pourrait permettre le développement d'une méthode d'analyse du signal permettant de détecter automatiquement les déviations significatives de la pupille. Cependant, l'utilisation systématique du silence comme contrôle permet déjà des observations intéressantes puisqu'il indique si une dilatation est significativement supérieure aux variations naturelles de la pupille. D'ailleurs l'idée précédente de la méthode d'analyse du signal pourrait dans un premier temps être reprise pour la comparaison au silence ; seules les dilatations significatives seraient mises en évidence.

2.2.2. Le couplage à d'autres mesures

Afin d'étudier des phénomènes complexes massivement multimodaux comme la dégustation de produits alimentaires (impliquant goût, olfaction, vision, mémoire, attention, etc.) une seule technique ne suffit pas et il faut développer des méthodes multi sources. Aussi, on l'a vu, le couplage est indispensable pour interpréter les données de manière plus fiable (couplage à d'autre(s) mesure(s) physiologique(s) et/ou comportementale(s) : meilleure élimination du bruit) et les qualifier (méthodes subjectives). Ce « double » couplage, pupille + autre mesure (par exemple, réponse électrodermale) + mesure subjective conduirait à un outil complet.

2.3. Pour aller plus loin

Enfin pour terminer, nous proposons une liste non exhaustive de quelques pistes pour aller plus loin :

- **Tester d'autres stimuli gustatifs** afin de voir si certains ne pourraient tout de même pas être émotionnels :

Il serait intéressant par exemple de choisir des produits pour chaque sujet. On pourrait imaginer lui demander, dans un questionnaire de recrutement, le ou les produit(s) qui le rend(ent) nostalgique. Tout comme nous avons montré un fort impact de la musique choisie pour chaque sujet, on pourrait observer quelque chose de similaire pour les produits.

- **Etendre les applications aux images** afin de pouvoir travailler sur des supports de communication comme les publicités :

Le caractère émotionnel des publicités est bien connu. D'ailleurs, de nombreuses méthodes ont été développées afin de mesurer ces émotions (Poels & Dewitte, 2006). Et pour cause, il est important pour les marques de créer de l'émotion dans leurs publicités car les émotions renforcent la mémorisation (Versace & Rose, 2007). Une publicité qui provoque des émotions est une publicité efficace. Cependant, en pupillométrie, travailler sur des images est complexe. Ainsi la mesure devrait impérativement être accompagnée d'une mesure de la luminosité afin de supprimer les effets dus à la lumière (Watson & Yellott, 2012).

- **Poursuivre les recherches autour des odeurs** qui semblent être de forts vecteurs émotionnels :

On pourrait par exemple travailler sur des odeurs plus complexes comme les parfums. Comme nous l'avons vu, des travaux ont déjà été menés afin de développer des outils d'évaluation des émotions pour les odeurs et/ou parfums (Chrea et al., 2009 ; Porcherot, 2010 ; 2012) mais à notre connaissance, la pupillométrie n'a jamais été utilisé dans ce domaine. Elle pourrait venir compléter ces mesures subjectives.

- **Travailler sur un modèle de prédiction** de l'impact sur l'appréciation hédonique :

Nous l'avons vu, la musique a entraîné une forte dilatation pupillaire et a eu un impact sur l'appréciation hédonique. A l'inverse, les ambiances ont entraîné de faibles dilatations pupillaires et n'ont pas eu d'impact sur l'appréciation hédonique (légère tendance). On pourrait alors imaginer qu'en accumulant beaucoup de données on pourrait être en mesure d'établir un modèle de prédiction de l'impact d'un stimulus extérieur sur l'appréciation hédonique.

3. Conclusion générale

Les perceptions sensorielles et hédoniques sont ainsi fondées sur des sentiments, des émotions et des souvenirs. Comprendre les émotions et le rôle qu'elles jouent dans la décision est donc un élément clé pour mieux appréhender le comportement des consommateurs et ainsi être en mesure de les satisfaire. Une fois déclenchée, l'émotion se manifeste à travers plusieurs composantes : la composante cognitive, la composante physiologique et la composante comportementale. En découle différentes méthodes pour mesurer les émotions : la composante cognitive renvoie, par définition, à l'évaluation que le sujet fait de son propre état émotionnel, la composante comportementale renvoie à la mesure d'un phénomène physique et spontané chez le sujet, l'expression faciale étant la manifestation émotionnelle expressive la plus souvent étudiée et enfin la composante physiologique renvoie aux manifestations physiologiques qui peuvent être considérées comme preuves de la manifestation d'une émotion (dilatation des pupilles, réponse électrodermale, rythme cardiaque, etc.). Aujourd'hui, en analyse sensorielle et science du consommateur, les émotions sont principalement

mesurées au travers de la composante cognitive, par questionnaire. Malheureusement, cette mesure reste subjective et limitée car les sujets ont du mal à identifier précisément leurs émotions par des mots. Aussi, il devient indispensable d'explorer les autres types de mesure afin d'avoir une meilleure appréhension de ces émotions.

Malgré le fait qu'il soit bien établi que le diamètre pupillaire est directement affecté par les stimuli émotionnels, très peu de données existent sur les stimuli gustatifs ou olfactifs. Ce travail de thèse a donc eu pour premier objectif de développer la pupillométrie en situation de dégustation, en prenant en compte les contraintes inhérentes à cette situation particulière. Cette méthodologie a ensuite été utilisée dans un premier temps afin d'effectuer une recherche systématique des possibles effets de différents stimuli chimio-sensoriels sur le diamètre pupillaire puis pour l'évaluation objective du pouvoir émotionnel de différents éléments du contexte (produits, musiques, ambiances, odeurs). Les résultats pupillométriques ont dans un premier temps mis en évidence que toute stimulation gustative, même dépourvue d'émotions déclarées, entraînait une dilatation pupillaire. Aussi, ceci met l'accent sur l'importance de comparer des stimuli similaires entre eux, d'avoir une situation contrôle ou bien de coupler à une autre mesure physiologique qui puisse permettre l'élimination du bruit. Egalement, on a mis en évidence la nécessité d'un couplage avec une mesure subjective (ex : questionnaire) ou comportementale afin de pouvoir qualifier l'émotion. En effet, la pupillométrie va mesurer une charge émotionnelle (mesure quantitative), mais elle ne donne aucune information d'un point de vue qualitatif. Enfin, les résultats ont montré que les différents éléments du contexte alimentaire avaient des pouvoirs émotionnels différents ; notamment les odeurs sont de forts vecteurs émotionnels tout comme les stimuli auditifs lorsqu'ils affectent directement le sujet. Egalement, il a été mis en évidence que la préférence n'est pas l'unique déterminant des émotions puisque nous avons observé plusieurs fois que malgré des différences hédoniques entre les produits, ceux-ci n'étaient pas discriminés émotionnellement par le diamètre pupillaire. Pour terminer, on a montré au travers de ce travail que les émotions peuvent impacter l'appréciation hédonique. Aussi, on pourrait imaginer que la pupillométrie soit un moyen de prédire cet impact.

A partir de ces observations différentes poursuites peuvent être envisagées. Certaines concernent l'amélioration de l'outil. En effet, cette thèse a permis de développer une méthodologie complète (acquisition, prétraitement, traitement). Cependant certaines limites ont été soulevées et pourraient être des pistes de poursuite pour améliorer l'outil. Parmi ces limites on retrouve (1) la qualité des données : des conditions plus extrapolables seraient à définir pour garantir une bonne qualité de données, (2) la reproductibilité : il serait intéressant d'étudier de manière plus spécifique la reproductibilité afin de savoir si les données de différentes études sont comparables, (3) le réalisme : assouplir les conditions expérimentales pourrait permettre au sujet d'être dans un cadre plus réaliste et cela permettrait une meilleure approche des émotions que pourrait ressentir le sujet en situation réelle et enfin (4) le couplage : le couplage est nécessaire à la bonne interprétation des données pupillaires et à la qualification des émotions. L'idéal serait de développer un outil complet couplant la pupille à une autre mesure physiologique et à une mesure déclarative. Les autres poursuites concernent l'utilisation de l'outil pour aller plus loin dans la compréhension des émotions et de leur influence afin de mieux comprendre et appréhender le comportement du consommateur. Notamment on a vu que les odeurs et

les stimuli auditifs entraînaient de plus fortes émotions que les produits et les stimuli auditifs plus impersonnels. Pour aller plus loin, il faudrait étendre ces observations à tous les éléments que l'on est susceptible de rencontrer dans un contexte alimentaire, d'autres produits, d'autres odeurs, d'autres stimuli auditifs. Chacun doit identifier ce qui peut intervenir autour de la consommation du produit qu'il aimerait tester. Ceci peut être étendu à la publicité qui existe dans le but de convaincre. Créer de l'émotion peut jouer sur la conviction.

Finalement, les émotions sont fortement associées à nos décisions ; sans elles, nous ne prendrions pas toujours les mêmes décisions. En effet, contrairement à la vision cartésienne longtemps adoptée, notre centre de décision implique directement l'émotion comme source d'informations complémentaires à l'analyse, et aide au tri parmi les options possibles. C'est Damasio le premier qui formula, en 1985, après avoir observé que des malades possédant de bonnes facultés mentales, prenaient des décisions nuisibles pour eux, l'hypothèse que les émotions jouaient un rôle dans la prise de décision. Cette influence sur nos décisions peut être rapportée à notre perception hédonique qui revient finalement à décider consciemment ou inconsciemment, j'aime ou je n'aime pas ce produit. En reprenant les idées ici avancées et le modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002), on peut expliquer le mécanisme d'influence de nos émotions de la manière suivante : (1) le stimulus active les traits sensoriels et moteurs = rationnel et (2) le stimulus active les traits émotionnels = émotionnel. Si le stimulus active peu de traits émotionnels, notre décision (j'aime, je n'aime pas) reposera plus sur un raisonnement rationnel : le goût est agréable, c'est facile à manger, etc. alors « J'aime ». Si le stimulus active des traits émotionnels, ceux-ci vont non seulement être intégrés pour la prise de décision mais ils vont surtout la faciliter ou la renforcer. Si des émotions positives sont activées, la réponse va se diriger plus facilement vers j'aime et l'appréciation pourra être augmentée et à l'inverse si ce sont des émotions négatives qui sont activées, la réponse va se diriger plus facilement vers je n'aime pas et l'appréciation pourra être diminuée. Ce travail de thèse est venu confirmer l'influence des états émotionnels sur la prise de décision. En effet, nous avons noté des appréciations différentes pour un même produit dans des « conditions émotionnelles » différentes. Les états émotionnels ont pu être mesurés au travers de la pupille et l'influence a été démontrée au travers de la mesure hédonique. La Figure 99 rapporte le mécanisme décrit ci-dessus en y intégrant les éléments testés au cours de l'expérience 3 rapportée dans le chapitre 5 à titre d'exemple.

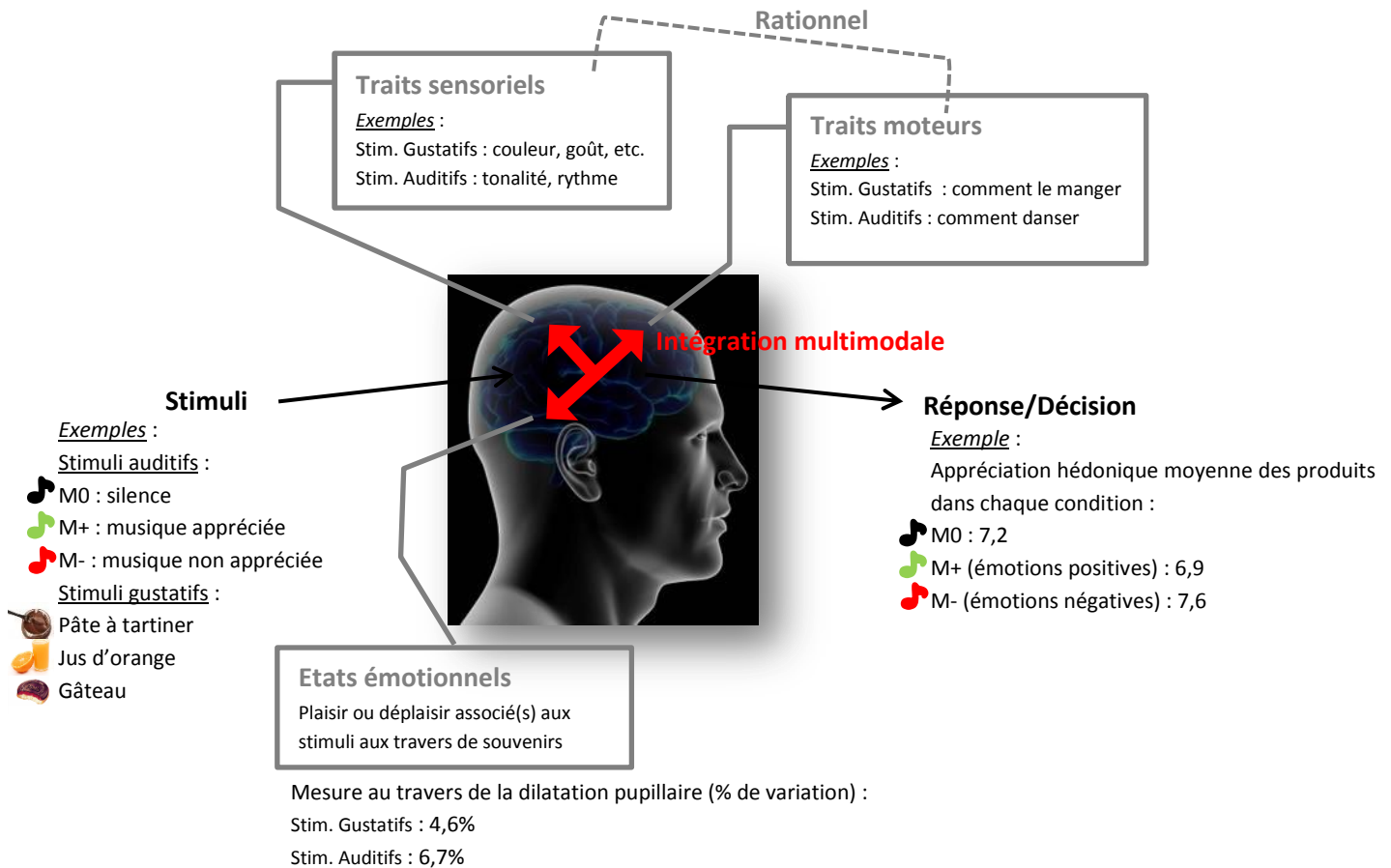


Figure 99. Mécanisme de la mémoire impliqué lors de la présentation de stimuli (exemple de l'expérience 3 rapportée dans le chapitre 5) (inspiré du modèle de Versace, Nevers & Padovan (2002))

La présentation des stimuli active les traits sensoriels et moteurs ainsi que les états émotionnels associés à ces derniers. Ces trois dimensions sont intégrées pour amener à la prise de décision. On confirme dans l'exemple présent :

- (1) l'activation d'états émotionnels: la pupille se dilate pour les stimuli gustatifs et auditifs confirmant la présence d'émotions
- (2) la prise en compte de ces états émotionnels dans la décision : pour un même produit (activation des mêmes traits sensoriels et moteur), la réponse hédonique varie en fonction des états émotionnels

Pour conclure les questions que pose notre travail et les perspectives proposées témoignent de l'ampleur du chemin qu'il reste à parcourir avant de pouvoir parfaitement appréhender les émotions et surtout comprendre comment elles exercent leur influence. C'est la perspective d'autant de projets à partager... ce n'est pas encore demain que nous lirons en notre voisin, comme dans un livre ouvert !

BIBLIOGRAPHIE

A

- Aboyoun, D. C., & Dabbs, J. M. (1998). The Hess pupil dilation findings: Sex or novelty? *Social Behavior and Personality*, 26, 415–420
- Adams R.D., Victor M. (1985). Principles of Neurology. 3rd Ed. New-York: Mc Graw-Hill Book Company, 1186 p
- AFNOR, Association Francaise De Normalisation (1989). NF V 09-002 : Analyse sensorielle méthodologie : méthode d'éveil à la sensibilité gustative. Paris : AFNOR, 9p
- Ahern, S. K. (1978). Activation and intelligence: Pupillometric correlates of individual difference in cognitive abilities. *Unpublished doctoral dissertation*. University of California, Los Angeles
- Ahern, S. K. & Beatty, J. (1979). Physiological signs of information processing vary with intelligence. *Science*, 205, 1289-1292
- Ahern, S. K. & Beatty, J. (1981). Physiological evidence that demand for processing capacity varies with intelligence. In M. Friedman, J. P. Dos, & N. O'Connor (Eds). *Intelligence and learning*. New York: Plenum Press
- Appelhans, B. M., & Luecken, L. J. (2006). Heart rate variability as an index of regulated emotional responding. *Review of General Psychology*, 10(3), 229–240. doi:10.1037/1089-2680.10.3.229
- Arnold, M. B. (1960). Emotion and personality Vol 1, Psychological Aspects. New York: Columbia University Press

B

- Badard, G. (2007). Activation et intégration multimodales en mémoire à long terme. Université Lumière Lyon 2 : Lyon, 181p. (Doctorat de Psychologie, mention Psychologie Cognitive : Lyon : 2007)
- Barker, M., & Rayens, W. (2003). Partial least squares for discrimination. *Journal of Chemometrics*, 17(3), 166–173. doi:10.1002/cem.785
- Barlow, J. D. (1969). Pupillary size as an index of preference in political candidates. *Perceptual and Motor Skills*, 28, 587–590
- Barsalou, L. W. (1993). Structure, flexibility, and linguistic vagary in concepts: Manifestations of a compositional system of perceptual symbols. In A. C. Collins, S. E. Gathercole & M. A. Conway (Eds.), *Theories of memory*. London: Lawrence Erlbaum Associates
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, 22, 577-609

- Barsalou, L. W., Hutterlocher, J & Lamberts, K. (1998). Basing categorization on individuals and events. *Cognitive Psychology*, 36, 203-272
- Barsalou, L. W., Solomon, K. O., & Wu, L. L. (1999). Perceptual simulation in conceptual tasks. In M. L. Hiraga, C. Sinha, & S. Wilcox (Eds.), *Cultural, typological, and psychological perspectives in cognitive linguistics : The Proceedings of the 4th conference of the International Cognitive Linguistics Association*, 3(209-228). Amsterdam: John Benjamins
- Bayer, M., Sommer, W., & Schacht, A. (2011). Emotional words impact the mind but not the body: evidence from pupillary responses. *Psychophysiology*, 48(11), 1553–1561. doi:10.1111/j.1469-8986.2011.01219.x
- Beatty, J. (1982). Task-Evoked Pupillary Responses, Processing Load, and the Structure of Processing Resources. *Psychological Bulletin*, 91(2), 276–292
- Beatty, J., & Schluroff, M. (1980). Pupillometric signs of brain activation reflect both syntactic and semantic factors in language processing. In *meeting of the Society for Psychophysiological Research*, Vancouver
- Beatty, J. & Wagoner, B. L. (1977). Activation and signal detection: A pupillometric analysis (Tech. Rep. 10). Los Angeles: University of California, Los Angeles, *Human Neurophysiology Laboratory*
- Beatty, J. & Wagoner, B. L. (1978). Pupillometric signs of brain activation vary with level of cognitive processing. *Science*, 199, 1216-1218
- Bechara, A., Tranel, D., Damasio, H., Adolphs R., Rockland, C., Damasio, A. R. (1995). Double dissociation of conditioning and declarative knowledge relative to the amygdala and hippocampus in humans. *Science*, 269(5227), 1115-1118
- Bernhardt, P. C., Dabbs, J. M., & Riad, J. K. (1996). Pupillometry system for use in social psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 28(1), 61–66. doi:10.3758/BF03203637
- Bernick, N., Kling, A., & Borowitz, G. (1971). Physiologic Differentiation of Sexual Arousal and Anxiety. *Psychosomatic Medicine*, 33(4), 341–352. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5112331>
- Beros, J. (2003). Les odeurs de la colère. *Le journal du CNRS*, 164-165
- Berthet, V. (2014). Modélisation stochastique de l'IAT : I. Théoris. *Manuscrit non publié*. Disponible à l'adresse suivante : http://vincentberthet.com/wp-content/uploads/2014/01/IAT_Stochastique.pdf
- Bitsios, P., Szabadi, E., & Bradshaw, C. (2004). The fear-inhibited light reflex: importance of the anticipation of an aversive event. *International Journal of Psychophysiology : Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 52(1), 87–95. doi:10.1016/j.ijpsycho.2003.12.006
- Blackwell, L. (1995). Visual cues and their effects on odour assessment. *Nutrition & Food Science*, 95, 24–28

- Bornemann, B., Foth, M., Horn, J., Ries, J., Warmuth, E., Wartenburger, I., & Meer, E. (2010). Mathematical cognition: individual differences in resource allocation. *Zdm Mathematics Education*, 42(6), 555–567. doi:10.1007/s11858-010-0253-x
- Bowen R., (Page consultée le 05 mai 2014). Physiology of taste. [En ligne]. <http://www.vivo.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/pregastric/taste.html>
- Bradley, M., & Lang, P. (1994). Measuring emotion: The self-Assessment Manikin and the semantic differential. *Journal of Behavioral Therapy & Experimental Psychiatry*, 1, 49-59
- Bradley, M., Miccoli, L., Escrig, M., & Lang, P. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4), 602–607. doi:10.1111/j.1469-8986.2008.00654.x
- Bradshaw, J. L. (1968). Pupil size and problem solving. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20(2), 116–122
- Burdach, K. J., Kroeze, J. H., & Koster, E. P. (1984). Nasal, retronasal, and gustatory perception: An experimental comparison. *Perception & Psychophysics*, 36(3), 205–208

C

- Cain, W. S. (1974). Contribution of the trigeminal nerve to perceived odor magnitude. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 237, 28–34
- Carretié, L., Iglesias, J., García, T., & Ballesteros, M. (1997). N300, P300 and the emotional processing of visual stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 103(2), 298–303. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9277632>
- Castellano, G., Villalba, S. D., Camurri, A. (2007). Recognising Human Emotions from Body Movement and Gesture Dynamic. *Affective Computing and Intelligent Interaction: Lecture Notes in Computer Science* 4738, 71-82
- Causse, M. ; Sénard, J.M. ; Démonet, J. F. ; Pastor, J. (2010). Monitoring cognitive and emotional processes through pupil and cardiac response during dynamic versus logical task. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 35(2), 115–123. doi:10.1007/s10484-009-9115-0
- Chrea, C., Grandjean, D., Delplanque, S., Cayeux, I., Le Calvé, B., Aymard, L., ... Scherer, K. R. (2009). Mapping the semantic space for the subjective experience of emotional responses to odors. *Chemical Senses*, 34, 49–62. doi:10.1093/chemse/bjn052
- Chrea, C., Valentin, D., Sulmont-Rossé, C., Ly Mai, H., Hoang Nguyen, D., & Abdi, H. (2004). Culture and odor categorization: agreement between cultures depends upon the odors. *Food Quality and Preference*, 15(7-8), 669–679. doi:10.1016/j.foodqual.2003.10.005
- Christensen, C. M. (1980). Effects of taste quality and intensity on oral perception of viscosity. *Perception & Psychophysics*, 28(4), 315–320

- Chu, S., Downes, J. J., & Building, E. R. (2000). Odour-evoked Autobiographical Memories : Psychological Investigations of Proustian Phenomena. *Chemical Senses*, 25, 111–116
- Clarke JE (1998) Taste and flavour: their importance in food choice and acceptance. *Proceedings of the Nutrition Society* 57, 639-643
- Cliff, M., & Noble, A. C. (1990). Time–intensity evaluation of sweetness and fruitiness and their interaction in a model solution. *Journal of Food Science*, 55, 450–454
- Clydesdale, F. M. (1984). The influence of colour on sensory perception and food choices. In J. Walford (Ed.), *Developments in food colours*, 75–112. London: Elsevier Applied Science.
- Clydesdale, F. M. (1993). Color as a factor in food choice. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(1), 83–101. doi:10.1080/10408399309527614
- Conway, C. A., Jones, B. C., Debruine, L. M., Little, A. C., & Sahraie, A. (2008). Transient pupil constrictions to faces are sensitive to orientation and species. *Journal of Vision*, 8, 1–11. doi:10.1167/8.3.17.Introduction
- Corson, Y. (2002). Variations émotionnelles et mémoire : principaux modèles explicatifs. *L'Année Psychologique*, 102, 109-149
- Crisinel, A.-S., Cosser, S., King, S., Jones, R., Petrie, J., & Spence, C. (2012). A bittersweet symphony: Systematically modulating the taste of food by changing the sonic properties of the soundtrack playing in the background. *Food Quality and Preference*, 24, 201–204. doi:10.1016/j.foodqual.2011.08.009
- Crisinel, A.-S., & Spence, C. (2009). Implicit association between basic tastes and pitch. *Neuroscience letters*, 464(1), 39–42
- Crisinel, A.-S., & Spence, C. (2010). As bitter as a trombone: Synesthetic correspondences in nonsynesthetes between tastes / flavors and musical notes. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(7), 1994–2002
- Crisinel, A.-S., & Spence, C. (2011). Crossmodal associations between flavoured milk solutions and musical notes. *Acta Psychologica*, 138(1), 155–161. doi:10.1016/j.actpsy.2011.05.018
- Crisinel, A.-S., & Spence, C. (2012). The impact of pleasantness ratings on crossmodal associations between food samples and musical notes. *Food Quality and Preference*, 24(1), 136–140
- Cruz, A., & Green, B. G. (2000). Thermal stimulation of taste. *Nature*, 403, 889–892

D

- Dalle, N., & Niedenthal, P.M. (2001). Le mariage de mon meilleur ami : Emotional response categorization and naturally induced emotions. *European Journal of Social Psychology*, 31, 737-742

- Damasio, R.D. (1985). Understanding the mind's will. *Behavioral and Brain Sciences* 8(4), 589-589
- Damasio, R.D. (1994). *L'Erreur de Descartes*. – Paris : Odile Jacob
- Davidson, J. M., Linforth, R. S. T., Hollowood, T. A., & Taylor, A. J. (1999). Effect of sucrose on the perceived flavor intensity of chewing gum. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 47, 4336–4340
- De Castro, J. M. (1997). Socio-cultural determinants of meal size and frequency. *The British Journal of Nutrition*, 77(Suppl. 1), S39–S55
- Deroy, O. (2010). Préférences et biais de familiarité. In *Le Sensolier* 8, Paris
- Deroy, O., & Valentin, D. (2011). Tasting liquid shapes: Investigating the sensory basis of cross-modal correspondences. *Chemosensory Perception*, 4(3), 80–90
- Dietz, J., Bradley, M. M., Okun, M. S., & Bowers, D. (2011). Emotion and ocular responses in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 49, 3247–3253. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.07.029
- Dimberg U. (1982). Facial reactions to facial expressions. *Psychophysiology* 19(6), 643–647
- Dimberg U. (1990). Facial electromyography and emotional reactions. *Psychophysiology* 27(5), 481-494
- Dimberg U. (1997). Facial reactions: Rapidly evoked emotional responses. *Journal of Psychophysiology* 11, 115–123
- Dimberg, U. & Karlsson, B. (1997). Facial reactions to different emotionally relevant stimuli. *Scandinavian Journal of Psychology* 38, 297–303
- Dimberg, U., Lundqvist, LO. (1990). Gender differences in facial reactions to facial expressions. *Biological psychology* 30(2), 151-159
- Dimberg U. & Petterson, M. (2000). Facial reactions to happy and angry facial expressions: Evidence for right hemisphere dominance. *Psychophysiology* 37(5), 693-696
- Dimberg, U. & Thunberg, M. (1998). Rapid facial reactions to emotional facial expressions. *Scandinavian journal of psychology* 39, 39–45
- Dimberg, U., Thunberg, M., & Grunedal, S. (2002). Facial reactions to emotional stimuli: Automatically controlled emotional responses. *Cognition & Emotion*, 16(4), 449–471. doi:10.1080/02699930143000356
- Dimberg, U., Thunberg, M., & Elmehe, K. (2000). Unconscious facial reactions to emotional facial expressions. *Psychological science* 11(1), 86-89
- Duffy, E. (1941). An Explanation of “Emotional” Phenomena without the use of the Concept “Emotion”. *The journal of General Psychology*, 25(2), 283-293
- Dufresne, A., Prom Tep, S., Senechal, S., & Courtemanche, F. (2010). Physiological Measures , Eye Tracking and Task Analysis to Track User Reactions in User Generated Content. *Proceedings of Measuring Behavior*, (August 24-27), 218–222

E

- Edwards, J. A., Hartwell, H. J. & Brown L (2013). The relationship between emotions, food consumption and meal acceptability when eating out of the home. *Food Quality and Preference*, 30(1), 22-32
- Edwards, J. S. A., Meiselman, H. L., Edwards, A., Leshner, L. (2003). The influence of eating location on the acceptability of identically prepared foods. *Food Quality and Preference* 14(8), 647-652
- Ekman, P. (1992a). Are there basic emotions? *Psychological Review*, 99(3), 550–553
- Ekman, P. (1992b). An argument for basic emotions. *Cognition & Emotion*, 6(3-4), 169–200
- Ekman, P., & Davidson, R. J. (1994). The nature of emotion: Fundamental questions. New York: Oxford University Press
- Ekman, P., Friesen, W. V., O'Sullivan, M. (1988). Smiles when lying. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(3), 414-420. doi: 10.1037/0022-3514.54.3.414
- Engell, D., Kramer, M., Malafi, T., Salomon, M., & Leshner, L. (1996). Effects of effort and social modeling on drinking in humans. *Appetite*, 26(2), 129–138
- Espeseth, T., Pieter van de Pavert, S., Jynge, S., Handal Sneve, M., & Laeng, B. (2010). The pupil dilates as a function of attentional effort in multiple object tracking. In *EyeTrackConf*, Uppsala

F

- Fartoukh M. (2013). Effet des émotions sur les processus rédactionnels et orthographiques chez les enfants de fin d'école élémentaire. Université de Nice Sophia Antipolis. (Doctorat de psychologie : Nice : 2013)
- Feldman Barrett, L. (1998). Discrete emotions or dimensions? The role of valence focus and arousal focus. *Cognition & Emotion*, 12(4), 579–599
- Feldman Barrett, L. (2006). Are emotions natural kinds? *Perspectives on Psychological Science*, 1(1), 28–58
- Fernández-vázquez, R., Hewson, L., Fisk, I., Vila, D. H., Jose, F., Mira, H., ... Hort, J. (2013). Colour influences sensory perception and liking of orange juice. *Flavour*, 3(1), 1–8
- Frank, R. A., & Byram, J. (1988). Taste-smell interactions are tastant and odorant dependent. *Chemical Senses*, 13(3), 445–455
- Frick, R. W. (1985). Communicating emotion: The role of prosodic features. *Psychological Bulletin*, 97(3), 412-429. doi: 10.1037/0033-2909.97.3.412

Frijda, N. H. (1986). *The emotions*. Cambridge and New York: Cambridge University Press.

G

Gabay, S ; Pertzov, Y ; Henik, A. (2011). Orienting of attention, pupil size, and the norepinephrine system. *Attention, Perception & Psychophysics*, 73(1), 123–129. doi:10.3758/s13414-010-0015-4

Gagl, B., Hawelka, S., & Hutzler, F. (2011). Systematic influence of gaze position on pupil size measurement: analysis and correction. *Behavior Research Methods*, 43(4), 1171–1181. doi:10.3758/s13428-011-0109-5

Gallace, A., Boschini, E., & Spence, C. (2011). On the taste of “Bouba” and “Kiki”: An exploration of word–food associations in neurologically normal participants. *Cognitive Neuroscience*, 2(1), 34–46

Gardner, R., M., Mo, S. S., Borrego, R. (1974). Inhibition of pupillary orienting reflex by novelty in conjunction with recognition memory. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 3(3), 237–238

Geangu, E., Hauf, P., Bhardwaj, R., & Bentz, W. (2011). Infant pupil diameter changes in response to others’ positive and negative emotions. *PloS One*, 6(11), 1–10. doi:10.1371/journal.pone.0027132

Gil, S. (2009). Comment étudier les émotions en laboratoire. *Revue électronique de Psychologie Sociale*, 4, 15–24. Disponible à l’adresse suivante : <<http://RePS.psychologie-sociale.org/>>

Glenberg, A. M. (1997). What memory is for ? *Behavioral and Brain Sciences*, 20, 1–55

Gorn, G. J. (1982). The Effects of Music In Advertising On Choice Behavior: A Classical Conditioning Approach. *Journal of Marketing*, 46(1), 155–161

Green, B. G. (2001). Psychophysical measurement of oral chemesthesis. In S. A. Simon & M. A. I. Nicolelis (Eds.), *Methods in chemosensory research*, 3–20. Boca Raton, FL: CRC Press

Gredebäck, G. (2010). Pupil dilation and social cognition in infancy. In *EyeTrackConf*, Uppsala

H

Hakerem, G. & Sutton, S. (1966). Pupillary response at visual threshold. *Nature*, 212, 485–486

Hein, K. A., Hamid, N., Jaeger, S. R., & Delahunty, C. M. (2010). Application of a written scenario to evoke a consumption context in a laboratory setting: Effects on hedonic ratings. *Food Quality and Preference*, 21(4), 410–416

Hein, K. A., Hamid, N., Jaeger, S. R., & Delahunty, C. M. (2012). Effects of evoked consumption contexts on hedonic ratings: A case study with two fruit beverages. *Food Quality and Preference*, 26(1), 35–44

- Hepach, R., & Westermann, G. (2010). Deriving meaning from infants' pupillary responses to emotional stimuli. In *EyeTrackConf*, Uppsala
- Herman, C. P., Roth, D. A., & Polivy, J. (2003). Effects of the presence of others on food intake: a normative interpretation. *Psychological Bulletin*, 129(6), 873–886
- Hermans, R. C. J., Herman, C. P., Larsen, J. K., & Engels, R. C. M. E. (2010). Social modeling effects on snack intake among young men. The role of hunger. *Appetite*, 54(2), 378–383
- Hermans, R. C. J., Larsen, J. K., Herman, C. P., & Engels, R. C. M. E. (2009). Effects of social modeling on young women's nutrient-dense food intake. *Appetite*, 53(1), 135–138
- Hersleth, M., Mevik, B.-H., Næs, T., & Guinard, J.-X. (2003). Effect of contextual factors on liking for wine — Use of robust design methodology. *Food Quality and Preference*, 14(7), 615–622
- Hess, E. H. et Polt J., M. (1960). Pupil Size as Related to Interest Value of Visual Stimuli. *Science*, 132, 349–350
- Hess, E. H. et Polt J. (1964). Pupil Size in Relation to Mental Activity during Simple Problem-Solving, *Science*, 143(3611), 1190–1192
- Hess, E. H. (1975). The Role of Pupil Size in Communication. *Scientific American*, 233(5), 116–119
- Hess, U., & Philippot, P. (1998). Facial Reactions to Emotional Facial Expressions : Affect or Cognition ? *Cognition and Emotion*, 12(4), 509–531
- Hess, E. H., & Polt, J. M. (1966). Changes in pupil size as a measure of taste difference. *Perceptual and Motor Skills*, 23, 451–455. Retrieved from <http://doi.apa.org/?uid=1967-00315-001>
- Hintzman, D. L. (1986). "Schema abstraction" in a multiple-trace memory model. *Psychological Review*, 93, 411–428
- Hladik C-M., Pasquet P., Simmen B., (2002). New perspectives on taste and primate evolution: the dichotomy in gustatory coding for perception vs. noxious substances as supported by correlations among human thresholds. *American Journal of Physical Anthropology*, 117, 342–348
<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/55/62/56/PDF/Hladik-TASTE.pdf>
- Hoerger, M., Chapman, B. P., Epstein, R. M., & Duberstein, P. R. (2012). Emotional intelligence: a theoretical framework for individual differences in affective forecasting. *Emotion*, 12, 716–725
- Höfle, M., Kenntner-Mabiala, R., Pauli, P., & Alpers, G. (2008). You can see pain in the eye: pupillometry as an index of pain intensity under different luminance conditions. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 70(3), 171–175. doi:10.1016/j.ijpsycho.2008.06.008
- Honma, M., Tanaka, Y., Osada, Y., & Kuriyama, K. (2012). Perceptual and not physical eye contact elicits pupillary dilation. *Biological Psychology*, 89, 112–116. doi:10.1016/j.biopsycho.2011.09.015

Hyönä, J., Tammola, J., & Alaja, A. M. (1995). Pupil Dilation as a Measure of Processing Load in Simultaneous Interpretation and Other Language Tasks. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48A(3), 598–612

I

Isen, A. M. (1984). Toward understanding the role of affect in cognition. In R. S. Wyer & T. K. Srull (Eds.), *Handbook of social cognition*, 73–108. Hillsdale, NJ: Erlbaum

Iqbal, S. T., Zheng, X. S., & Bailey, B. P. (2004). Task-evoked pupillary response to mental workload in human-computer interaction. In *Conference on Human factors and computing systems - CHI*. Vienna, Austria: ACM Press. doi:10.1145/985921.986094

Izard, C.E. (1977). *Human emotions*. New York: Plenum Press

Izard, C. E. (1992). Basic emotions, relations among emotions, and emotion-cognition relations. *Psychological Review*, 99(3), 561–565

J

Jackson, I., & Sirois, S. (2009). Infant cognition: going full factorial with pupil dilation. *Developmental Science*, 12(4), 670–679. doi:10.1111/j.1467-7687.2008.00805.x

Jacob-Lebas, M., & Vignal-Clermont, C. (2011). Pathologie pupillaire. *Ophtalmologie / Neurologie*, 21-510-A-1(343683), 1–24

Jainta, S., & Baccino, T. (2010). Analyzing the pupil response due to increased cognitive demand: An independent component analysis study. *International Journal of Psychophysiology*, 77(1), 1–7. doi:10.1016/j.ijpsycho.2010.03.008

Jakesch, M., Zachhuber, M., Leder, H., Spingler, M., & Carbon, C.-C. (2011). Scenario-based touching: On the influence of top-down processes on tactile and visual appreciation. *Research in Engineering Design*, 22(3), 143–152

Janisse, M. P. (1974). Pupil size, affect and exposure frequency. *Social Behavior & Personality* 2(2), 125

Johansson, R., Holmqvist, K., Mossberg, F., & Lindgren, M. (2011). Eye movements and reading comprehension while listening to preferred and non-preferred study music. *Psychology of Music*, 40(3), 339–356. doi:10.1177/0305735610387777

K

- Kahneman, D., & Beatty J. (1966). Pupil diameter and load on memory. *Science*, 154, 1583-1585
- Kellaris, J. J., & Cox, A. D. (1989). The Effects of Background Music in Advertising: A Reassessment. *Journal of Consumer Research*, 16(1), 113–118
- Khalfa, S., Isabelle, P., Jean-Pierre, B., & Manon, R. (2002). Event-related skin conductance responses to musical emotions in humans. *Neuroscience Letters*, 328(2), 145–149. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12133576>
- King, S. C., Meiselman, H. L., & Carr, T. B. (2010). Measuring emotions associated with foods in consumer testing. *Food Quality and Preference*, 21, 1114–1116. doi:10.1016/j.foodqual.2010.08.004
- King, S. C., Meiselman, H. L., Hottenstein, A. W., Work, T. M., & Cronk, V. (2007). The effects of contextual variables on food acceptability: A confirmatory study. *Food Quality and Preference*, 18(1), 58–65. doi:10.1016/j.foodqual.2005.07.014
- King, S. C., Weber, A. J., Meiselman, H. L., Lv, N. (2004). The effect of meal situation, social interaction, physical environment and choice on food acceptability. *Food Quality and Preference* 15(7-8), 645-653
- Klingner, J., Kumar, R., & Hanrahan, P. (2008). Measuring the Task-Evoked Pupillary Response with a Remote Eye Tracker. In *Eye Tracking Research & Applications - ETRA*. Savannah, Georgia
- Knöferle, K., & Spence, C. (2012). Crossmodal correspondences between sounds and tastes. *Psychonomic Bulletin & Review* 19, 992-1006
- Koenigs, M., Young, L., Adolphs, R., Tranel, D., Cushman, F., Hauser, M., & Damasio, A. (2007). Damage to the prefrontal cortex increases utilitarian moral judgements. *Nature*, 446(7138), 908–911
- Köster, E. P. (2009). Diversity in the determinants of food choice: A psychological perspective. *Food Quality and Preference*, 20(2), 70–82
- Kuchinke, L., Schneider, D., Kotz, S. a, & Jacobs, A. M. (2011). Spontaneous but not explicit processing of positive sentences impaired in Asperger's syndrome: pupillometric evidence. *Neuropsychologia*, 49(3), 331–338. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.026
- Kuchinke, L., Vö, M. L.-H., Hofmann, M., & Jacobs, A. M. (2007). Pupillary responses during lexical decisions vary with word frequency but not emotional valence. *International Journal of Psychophysiology*, 65(2), 132–140. doi:10.1016/j.ijpsycho.2007.04.004
- Kuchinsky, S. E., Ahlstrom, J. B., Vaden, K. I., Cute, S. L., Humes, L. E., Dubno, J. R., & Eckert, M. a. (2013). Pupil size varies with word listening and response selection difficulty in older adults with hearing loss. *Psychophysiology*, 50(1), 23–34. doi:10.1111/j.1469-8986.2012.01477.x

L

- Laeng, B. (2010). Eyes Wide Open - The Pupillometry of Desire. In *EyeTrackConf*, Uppsala

- Laeng, B., & Falkenberg, L. (2007). Women's pupillary responses to sexually significant others during the hormonal cycle. *Hormones and Behavior*, 52(4), 520–530. doi:10.1016/j.yhbeh.2007.07.013
- Lang, P. J., Bradley, M. M. & Cuthbert B. N. (2005). International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual. Technical Report A-6. University of Florida, Gainesville, FL
- Larmande P., & Larmande A. (1989). *Neuro-ophtalmologie*. Paris : Masson, 250 p
- Lazarus, R.S. (1991). Progress on a cognitive-motivational-relation theory of emotion. *American Psychologist*, 46, 819-834
- Leventhal, H. (1980). Toward a comprehensive theory of emotion. In L. Berkowitz (Ed.), *Advances in Experimental Social Psychology*, 140-208. New York: Academic Press
- Leventhal, H., & Scherer, K. R. (1987). The relationship of emotion to cognition: A functional approach to a semantic controversy. *Cognition and Emotion*, 1, 328
- Loewenfeld, I. E. (1993). *Chapter 13*, 648–678
- Loewenstein, F., Hsee, C. K., Weber, U. & Welch N. (2001). Risk as Feelings. *Psychological Bulletin*, 127, 267–286
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95, 492-527
- Lopez, E. (2006). Les émotions. <<http://edouard-lopez.com/fac/SciCo%20-%20S2/Bio%20comportemental/>> (08/03/2006)
- Luminet, O. (2002). *Psychologie des émotions : confrontation et évitement*. Bruxelles : De Boeck
- Lundqvist L. (1995). Facial EMG reactions to facial expressions: a case of facial emotional contagion? *Scandinavian journal of psychology* 36(2), 130-141
- Lyman, B. (1982). The nutritional values and food group characteristics of foods preferred during various emotions. *The Journal of Psychology*, 112(1st Half), 121–127. doi:10.1080/00223980.1982.9923544

M

- Machleidt W, Gutjahr L, Mügge A. (1989). [Basic emotions. Phenomenology, psychodynamics, EEG spectral analysis]. [Article in German] *Monogr Gesamtgeb Psychiatr Psychiatri Ser.* 57, 1-251
- Macht, M. (1999). Characteristics of Eating in Anger , Fear , Sadness and Joy. *Appetite*, 33, 129–139
- Mandler, J. M. (1992). How to build a baby: II. Conceptual primitives. *Psychological Review*, 99, 587-604
- Margolin, E., & Chan, C. (2008). L'anatomie et la physiologie de la pupille et les pathologies associées. *Ophtalmologie Conférences Scientifiques*, 6(5)

- Maric, Y., & Jacquot, M. (2013). Contribution to understanding odour–colour associations. *Food Quality and Preference*, 27(2), 191–195
- Mayer, J.D., & Gaschke, Y.N. (1988). The experience and meta-experience of mood. *Journal of Personality and Social Psychology*, 55, 102–111
- Mehrabian, A., & Russell, J.A. (1974). *An approach to environmental psychology*. Cambridge, MA: MIT Press
- Moody, E. J., McIntosh, D. N., Mann, L. J., & Weisser, K. R. (2007). More than mere mimicry? The influence of emotion on rapid facial reactions to faces. *Emotion (Washington, D.C.)*, 7(2), 447–457. doi:10.1037/1528-3542.7.2.447
- Meiselman, H. L., Johnson, J. L., Reeve, W., & Crouch, J. E. (2000). Demonstrations of the influence of the eating environment on food acceptance. *Appetite*, 35(3), 231–237. doi:10.1006/appe.2000.0360
- Morrot, G., Brochet, F., & Dubourdieu, D. (2001). The color of odors. *Brain and Language*, 79(2), 309–320. doi:10.1006/brln.2001.2493

N

- Ng, M., Chaya, C., & Hort, J. (2013). Beyond liking: Comparing the measurement of emotional response using EsSense Profile and consumer defined check-all-that-apply methodologies. *Food Quality and Preference*, 28, 193–205. doi:10.1016/j.foodqual.2012.08.012
- North, A. C. (2012). The Effect of Background Music on the Taste of Wine. *British Journal of Psychology*, 103(3), 293–301

O

- Oberfeld, D., Hecht, H., Allendorf, U., & Wickelmaier, F. (2009). Ambient lighting modifies the flavor of wine. *Journal of Sensory Studies*, 24(6), 797–832
- Ortony, A., & Turner, T. J. (1990). What's basic about basic emotions? *Psychological Review*, 97(3), 315–331
- Osgood, C. E. (1962). Studies on the generality of affective meaning systems. *American Psychologist*, 17(1), 10–28
- Otero, S. C., Weekes, B. S., & Hutton, S. B. (2011). Pupil size changes during recognition memory. *Psychophysiology*, 48, 1346–1353. doi:10.1111/j.1469-8986.2011.01217.x
- Ouss, L., Carton, S., Jouvent, R., & Widlocher, D. (1990). Traduction et validation de l'échelle d'émotions différentielle d'Izard : Exploration de la qualification verbale des émotions. *L'Encéphale*, 16, 453–458

P

- Pages, J., Bertrand, C., Ali, R., Husson, F., & Lê, S. (2007). French and Pakistani panels. *Journal of Sensory Studies*, 22, 665–686
- Palinko, O ; Kun, A L ; Shyrokov, Al ; Heeman, P. (2010). Estimating cognitive load using remote eye tracking in a driving simulator. *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications - ETRA '10*, 141. doi:10.1145/1743666.1743701
- Pangborn, R. M., Guinard, J., Hyvnen, F. I. N. L., Rose, C. A. L., & Pangborn, M. (1988). Regional aroma preferences. *Food Quality and Preference*, 1(1), 11–19
- Papesh, M. H., Goldinger, S. D. & Hout, M., C. (2012). Memory strength and specificity revealed by pupillometry. *International Journal of Psychophysiology* 83(1), 56-64
- Partala, T., & Surakka, V. (2003). Pupil size variation as an indication of affective processing. *International Journal of Human-Computer Studies*, 59(1-2), 185–198. doi:10.1016/S1071-5819(03)00017-X
- Peavler W. S. (1974). Individual differences in pupil size and performance. In M. Janiss (Ed.), *Pupillary dynamics and behavior*. New York: Plenum Press
- Pelchat, M. L., Johnson, A., Chan, R., Valdez, J., & Ragland, J. D. (2004). Images of desire: food-craving activation during fMRI. *NeuroImage*, 23(4), 1486–1493. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.08.023
- Petit, C., & Sieffermann, J. M. (2007). Testing consumer preferences for iced-coffee: Does the drinking environment have any influence? *Food Quality and Preference*, 18(1), 161–172. doi:10.1016/j.foodqual.2006.05.008
- Pineau, E. P., Rytz, A., Gerebtzoff, D., Godinot, N., Hudry, J., Maier, A. & Alexander, E. (2010) Do different flavors generate different emotions? A multidisciplinary approach to measure the emotional response related to beverage consumption. In *Fourth European Conference on Sensory and Consumer Research: A Sense of Quality*, Vitoria-Gasteiz, Spain
- Piquado, T., Isaacowitz, D., & Wingfield, A. (2010). Pupillometry as a Measure of Cognitive Effort in Younger and Older Adults. *Psychophysiology*, 47(3), 560–569. doi:10.1111/j.1469-8986.2009.00947.x.Pupillometry
- Plutchik, R. (2001). The Nature of Emotions. *American Scientist*, 89, 344–350
- Poels, K. & Dewitte, S., (2006). How to capture the heart? Reviewing 20 years of emotion measurement in advertising. *Journal of Advertising Research*
- Porcherot, C., Delplanque, S., Raviot-Derrien, S., Le Calvé, B., Chrea, C., Gaudreau, N., & Cayeux, I. (2010). How do you feel when you smell this? Optimization of a verbal measurement of odor-elicited emotions. *Food Quality and Preference*, 21(8), 938–947. doi:10.1016/j.foodqual.2010.03.012

- Porcherot, C., Delplanque, S., Planchais, A., Gaudreau, N., Accolla, R., & Cayeux, I. (2012). Influence of food odorant names on the verbal measurement of emotions. *Food Quality and Preference*, 23, 125–133. doi:10.1016/j.foodqual.2011.07.006
- Prehn, K., Heekeren, H. R., & van der Meer, E. (2011). Influence of affective significance on different levels of processing using pupil dilation in an analogical reasoning task. *International Journal of Psychophysiology*, 79, 236–243. doi:10.1016/j.ijpsycho.2010.10.014
- Prescott, J., Allen, S., & Stephens, L. (1984). Interactions between oral chemical irritation taste and temperature. *Chemical Senses*, 18(4), 389–404
- Prescott, J., & Stevenson, R. J. (1995). Effects of oral chemical irritation on tastes and flavors in frequent and infrequent users of chili. *Physiology & Behavior*, 58(6), 1117–1127. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8623010>
- Pritchard T.C., Alloway K.D. (2002). Neurosciences médicales
- Pulvermüller, F. (1999). Words in the brain's language. *Behavioral and Brain Sciences*, 22, 253-336
- Pylyshyn, Z. W. (1984). *Computation and cognition: Towards a foundation for cognitive science*. Cambridge, MA : The MIT Press

R

- Raisig, S., Welke, T., Hagendorf, H., & van der Meer, E. (2007). Investigating dimensional organization in scripts using the pupillary response. *Psychophysiology*, 44(6), 864–873. doi:10.1111/j.1469-8986.2007.00592.x
- Raisig, S., Welke, T., Hagendorf, H., & van der Meer, E. (2010). I spy with my little eye: detection of temporal violations in event sequences and the pupillary response. *International Journal of Psychophysiology : Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 76(1), 1–8. doi:10.1016/j.ijpsycho.2010.01.006
- Reber, R., Schwarz, N., & Winkielman, P. (2004). Processing fluency and aesthetic pleasure: is beauty in the perceiver's processing experience? *Personality and Social Psychology Review*, 8(4), 364–382. doi:10.1207/s15327957pspr0804_3
- Renard G., Lemasson C., Saraux H. (1965). Anatomie de l'œil et de ses annexes. Paris : Masson, 374 p
- Rieger, G., & Savin-Williams, R. C. (2012). The Eyes Have It: Sex and Sexual Orientation Differences in Pupil Dilation Patterns. *PloS One*, 7(8), 1–10. doi:10.1371/journal.pone.0040256
- Rougier, M., & Riss, I. (2000). Motricité pupillaire. *Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Neurologie*, 17-023-A-4, 8p
- Robert A., Lapresle J. (1990). Physiologie de l'iris. *Encycl. Méd. Chir. : Ophtalmologie* ; fasc. 21024 A10, 6 p

Russel, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 30(6), 1161-1178

Russel, J. A. & Mehrabian, A. (1977). Evidence for a three-factor theory of emotions. *Journal of Research in Personality*, 11, 273-294

S

Sander, D., Grandjean, D., & Scherer, K. R. (2005). A systems approach to appraisal mechanisms in emotion. *Neural Network*, 18(4), 317–352

Sander, D., & Scherer, K. R. (2009). La psychologie des émotions : survol des théories et débats essentiels. In D. Sander & K. R. Scherer (Eds.), *Traité de psychologie des émotions* (Dunod., 1–40). Paris

Saraux H., Biais B., Rossaza C. (1988). *Ophthalmologie*. 2ème éd. Paris : Masson, 558 p

Schachter, S. & Singer, J. E. (1962). Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. *Psychological Review*, 69, 379-399

Scherer, K. R. (1984). Emotion as a multicomponent process: A model and some cross cultural data. *Review of Personality & Social Psychology*, 5, 37-63

Schifferstein, H. N. J., & Verleghe, P. W. J. (1996). The role of congruency and pleasantness in odor-induced taste enhancement. *Acta Psychologica*, 94, 87–105

Schneider, C., Ziemssen, T., Schuster, B., Seo, H., Haehner, A., & Hummel, T. (2009). Pupillary responses to intranasal trigeminal and olfactory stimulation. *Journal of Neural Transmission*, 116(7), 885–889. doi:10.1007/s00702-009-0244-7

Sediva, A., Panovska, Z., & Pokorný, J. (2004). Effect of Viscosity on the Perceived Intensity of Acid Taste. *Czech Journal Food Science*, 22(4), 143–150

Seo, H.-S., Arshamian, A., Schemmer, K., Scheer, I., Sander, T., Ritter, G., & Hummel, T. (2010). Cross-modal integration between odors and abstract symbols. *Neuroscience Letters*, 478, 175–178

Seo, H.-S., & Hummel, T. (2011). Auditory-olfactory integration: congruent or pleasant sounds amplify odor pleasantness. *Chemical Senses*, 36(3), 301–309. doi:10.1093/chemse/bjq129

Seo, H.-S., Lee, Y., Yoon, N.-R., Song, J. M., Shin, J.-M., Lee, S.-Y., & Hwang, I. (2009). Impacts of sensory attributes and emotional responses on the hedonic ratings of odors in dairy products. *Appetite*, 53(1), 50–55. doi:10.1016/j.appet.2009.05.010

Sester, C., Deroy, O., Sutan, A., Galia, F., Desmarchelier, J.-F., Valentin, D., & Dacremont, C. (2013). “‘Having a drink in a bar’”: An immersive approach to explore the effects of context on drink choice. *Food Quality and Preference*, 28, 23–31. doi:10.1016/j.foodqual.2012.07.006

- Siemer, M., Mauss, I., & Gross, J. J. (2007). Same situation-Different emotions: How appraisals shape our emotions. *Emotion*, 7(3), 592–600
- Siegle, G. J., Granholm, E., Ingram, R. E., & Matt, G. E. (2001). Pupillary and Reaction Time Measures of Sustained Processing of Negative Information in Depression. *Biological Psychiatry*, 49, 624–636. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11297720>
- Siegle, G. J., Steinhauer, S. R., Carter, C. S., Ramel, W., & Thase, M. E. (2003). Do the Seconds Turn Into Hours ? Relationships Between Sustained Pupil Dilation in Response to Emotional Information and Self-Reported Rumination. *Cognitive Therapy and Research*, 27(3), 365–382
- Sirois, S., & Jackson, I. (2010). Pupil Dilation, Goal Attribution, and Object Identity in Infants. In *EyeTrackConf*, Uppsala
- Smadja D., Mas J. L., de Recondo. (1988). J. Anatomie des voies sympathiques et parasympathiques oculaires. *Encycl. Méd. Chir. : Ophtalmologie ; fasc. 21007 A 50*, 4 p
- Solomon, K. O. & Barsalou, L. W. (2001). Representing properties locally. *Cognitive Psychology*, 43, 129–169
- Spence, C. (2012). Auditory contributions to flavour perception and feeding behaviour. *Physiology & Behavior*, 107(4), 505–515
- Spence, C., & Gallace, A. (2011). Tasting shapes and words. *Food Quality and Preference*, 22(3), 290–295
- Spence, C., & Shankar, M. U. (2010). The influence of auditory cues on the perception of, and response to, food and drink. *Journal of Sensory Studies*, 25, 406–430
- Stanners, R. F., Coulter, M., Sweet, A. W., & Murphy, P. (1979). The Pupillary Response as an Indicator of Arousal and Cognition. *Motivation and Emotion*, 3(4), 319–340
- Steiner JE (1977). Facial expressions of the neonate infant indicating the hedonics of food-related chemical stimuli. In: Weiffenbach J. ed. *Taste and development: The Genesis of Sweet Preference*. (DHEW Publication No. NIH 77-1068). Washington DC: US Government Printing Office, 173
- Stevens, D. A., & Lawless, H. T. (1986). Putting out the fire: effects of tastants on oral chemical irritation. *Perception & Psychophysics*, 39(5), 346–350. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3737366>
- Stevenson, R. J., Prescott, J., & Boakes, R. a. (1999). Confusing tastes and smells: how odours can influence the perception of sweet and sour tastes. *Chemical Senses*, 24(6), 627–635. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10587495>
- Stone, B., Lee, M., Dennis, S., & Nettelbeck, T. (2003). Pupil Size and Mental Load
- Surakka, V., Hietanen, J.K. (1998). Facial and emotional reactions to duchenne and non-duchenne smiles. *International Journal of Psychophysiology* 29, 23–33

T

Talbot, F. (1995). Le syndrome de Pourfour du petit. Histoire et Revue de la littérature à propos de deux cas. Université de Caen : Faculté de Médecine. (Doctorat de médecine : Caen : 1995)

Tucker, M. & Ellis, R. (1998). On the relations between seen objects and components of potential actions. *Journal of experimental psychology: Human Perception and Performance*, 24(3), 830-846

U

Ullwer, D., Bornemann, B., Ries, J., Horn, J., Foth, M., Preusse, F., ... Van der Meer, E. (2009). Resource allocation and problem solving strategies during a geometric analogy task in individuals differing in fluid intelligence. In *2nd Analogy Conference*

Ullwer, D., Ries, J., Foth, M., & Van der Meer, E. (2010). Resource Allocation and Learning in Individuals Differing in Cognitive Abilities - Insights from Pupillometry and Eye - Movement Analysis. In *EyeTrackConf*, Uppsala

Ungerleider, L.G. (1995). Functional brain imaging studies of cortical mechanisms for memory. *Science*, 270, 769-775

V

Verney, S. P., Granholm, E., & Dionisio, D. P. (2001). Pupillary responses and processing resources on the visual backward masking task. *Psychophysiology*, 38, 76–83. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11321622>

Versace, R. & Nevers, B. (2001). Sur les traces de la mémoire. *La mémoire et l'oubli*, 344, 92. Disponible à l'adresse suivante : < <http://www.larecherche.fr/savoirs/dossier/traces-memoire-01-07-2001-86247> >

Versace, R., Nevers, B. & Padovan, C. (2002). La mémoire dans tous ses états. Marseille : Solala

Versace, R., & Rose, M. (2007). The role of emotion in multimodal integration, *Current Psychology Letters, Behaviour, Brain & Cognition*, 21(1)

Võ, M. L.-H., Jacobs, A. M., & Conrad, M. (2006). Cross-validating the Berlin Affective Word List. *Behavior Research Methods*, 38, 606-609

Võ, M., Jacobs, A. M., Kuchinke, L., Hofmann, M., Conrad, M., Schacht, A., & Hutzler, F. (2008). The coupling of emotion and cognition in the eye: introducing the pupil old/new effect. *Psychophysiology*, 45(1), 130–140. doi:10.1111/j.1469-8986.2007.00606.x

Voirol, E., & Daget, N. (1989). Direct nasal and oronasal profiling of a meat flavouring: Influence of temperature, concentration and additives. *Lebensmittel—Wissenschaft Technologie*, 22, 399–405

W

Wansink, B. (2006). *Mindless eating: Why we eat more than we think*. New York: Bantam Books

Wansink, B., & Sobal, J. (2007). Mindless eating: the 200 daily food decisions we overlook. *Environment and Behavior*, 39, 106-123

Watson, A. B., & Yellott, J. I. (2012). A unified formula for light-adapted pupil size. *Journal of Vision*, 12(10), 1–16. doi:10.1167/12.10.12

Werle, C. O. C., Wansink, B., & Payne, C. R. (2011). Just thinking about exercise makes me serve more food. Physical activity and calorie compensation. *Appetite*, 56(2), 332–335

Whittlesea, B. W. A. (1987). Preservation of specific experiences in the representation of general knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15, 643-656

Wierda, S. M., Rijn, H. Van, Taatgen, N. A., & Martens, S. (2012). Pupil dilation deconvolution reveals the dynamics of attention at high temporal resolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(22), 8456-8460
doi:10.1073/pnas.1201858109/-/DCSupplemental.www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1201858109

Wilhelm, H. (2008). The pupil. *Current Opinion in Neurology* 21(1), 36-42

Wilhelm, H., & Wilhelm, B. (2010). View onto alertness – objective assessment of central nervous activation level by pupillography.pdf. In *EyeTrackConf*, Uppsala

Wilson-Mendenhall, C. D., Feldman Barrett, L., Simmons, W. K., & Barsalou, L. W. (2011). Grounding emotion in situated conceptualization. *Neuropsychologia*, 49(5), 1105–1127

Wirtz, J., Mattila, A. S., & Tan, R. L. P. (2007). The role of arousal congruency in influencing consumers' satisfaction evaluations and in-store behaviors. *International Journal of Service Industry Management*, 18(1), 6–24

Winkielman, P., Schwarz, N., Fazendeiro, T. A., Reber, R., & Erlbaum, L. (2003). The Hedonic Marking of Processing Fluency: Implications for Evaluative Judgment. In *The Psychology of Evaluation: Affective Processes in Cognition and Emotion*, 1–30

Wu, E., Laeng, B., & Magnussen, S. (2010). Through the Eyes of the Own-Race Bias. In *EyeTrackConf*, Uppsala

Wundt, W. (1896). *Grundriss der Psychologie*. Leipzig : Entgelmann

Wundt, W. (1897). *Outlines of psychology*. (C. H. Judd, Tran.). Bristol: Thoemmes Press

Z

- Zajonc, R. B. (1968). Attitudinal effects of mere exposure. *Journal of Personality and Social Psychology Monograph Supplement*, 9(2), 1–27
- Zajonc, R. B. (1980). Feeling and thinking : Preferences need no inferences, *The American Psychologist*, 35, 151-175
- Zajonc, R. B. (1984). On the primacy of affect. *American Psychologist*, 39(2), 117–123
- Zajonc, R. B. (2001). Mere Exposure: A Gateway to the Subliminal. *Current Directions in Psychological Science*, 10(6), 224–228
- Zampini, M. (2008). Multisensory flavor perception: Assessing the influence of fruit acids and color cues on the perception of fruit-flavored beverages. *Food Quality and Preference*, 19(3), 335–343
- Zampini, M., Sanabria, D., Phillips, N., & Spence, C. (2007). The multisensory perception of flavor: Assessing the influence of color cues on flavor discrimination responses. *Food Quality and Preference*, 18(7), 975–984. doi:10.1016/j.foodqual.2007.04.001
- Zampini, M., & Spence, C. (2004). The Role of Auditory Cues in Modulating the Perceived Crispness and Staleness of Potato Chips. *Journal of Sensory Studies*, 19(5), 347–363. doi:10.1111/j.1745-459x.2004.080403.x
- Zampini, M., & Spence, C. (2005). Modifying the multisensory perception of a carbonated beverage using auditory cues. *Food Quality and Preference*, 16, 632–641. doi:10.1016/j.foodqual.2004.11.004
- Zampini, M., & Spence, C. (2010). Assessing the role of sound in the perception of food and drink. *Chemosensory Perception*, 3(1), 57–67
- Zampini M., Wantling E., Phillips N., Spence C. (2008). Multisensory flavor perception: Assessing the influence of fruit acids and color cues on the perception of fruit-flavored beverages. *Food Quality and Preference* 19(3), 335-343
- Zander, M. F. (2006). Musical Influences in Advertising endorsers and brands. *Psychology of Music*, 34(4), 465–480
- Zellner, D. A., & Kautz, M. A. (1990). Color Affects Perceived Odor Intensity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 391–397

ANNEXES

Annexe n° 1 : Plans d'expériences
--

Expérience 1 rapportée dans le chapitre 5**Tableau 54. Plan d'expérience utilisé pour l'expérience 1 rapportée dans le chapitre 5**

Sujet	Sirops de fraise			Compotes		Pâtes à tartiner		
1	1	2	3	2	3	1	1	2
2	2	1	3	1	3	2	1	2
3	1	2	3	2	3	1	2	1
4	2	1	3	3	2	1	2	1
5	1	3	2	2	1	3	1	2
6	3	1	2	1	2	3	1	2
7	1	3	2	3	2	1	2	1
8	3	1	2	1	2	3	2	1
9	2	3	1	3	1	2	1	2
10	3	2	1	1	3	2	1	2
11	2	3	1	3	1	2	2	1
12	3	2	1	2	1	3	2	1

Expérience 2 rapportée dans le chapitre 5**Tableau 55. Plan d'expérience utilisé pour l'expérience 2 rapportée dans le chapitre 5**

1ère séance										2ème séance						
1	5	8	2	6	1	3	7	4	16	10	9	11	15	12	13	14
2	3	2	6	5	1	8	7	4	9	12	16	15	11	14	10	13
3	7	4	3	6	8	2	1	5	12	15	14	10	11	16	9	13
4	6	1	7	8	4	5	3	2	11	10	15	14	13	12	9	16
5	6	5	4	1	2	7	8	3	11	13	16	12	14	9	10	15
6	2	7	1	3	5	4	6	8	13	15	11	16	9	14	12	10
7	6	8	2	3	1	7	5	4	15	16	13	10	14	11	9	12
8	8	3	4	7	2	5	6	1	16	15	9	13	14	11	12	10
9	1	4	3	5	8	6	7	2	16	14	12	10	13	9	11	15
10	2	1	6	4	3	8	5	7	10	11	12	16	14	15	13	9
11	7	1	2	8	4	6	3	5	12	9	15	13	11	10	16	14
12	7	3	1	4	8	5	2	6	13	11	14	12	15	10	16	9
13	5	6	3	1	7	2	4	8	12	13	10	9	16	11	15	14
14	1	5	7	6	2	4	3	8	10	16	13	11	12	9	14	15
15	1	6	5	2	4	7	8	3	12	14	16	15	13	9	10	11
16	13	16	10	14	9	11	15	12	8	2	1	3	7	4	5	6
17	11	10	14	13	9	16	15	12	1	4	8	7	3	6	2	5
18	15	12	11	14	16	10	9	13	4	7	6	2	3	8	1	5
19	14	9	15	16	12	13	11	10	3	2	7	6	5	4	1	8
20	14	13	12	9	10	15	16	11	3	5	8	4	6	1	2	7
21	10	15	9	11	13	12	14	16	5	7	3	8	1	6	4	2
22	14	16	10	11	9	15	13	12	7	8	5	2	6	3	1	4
23	16	11	12	15	10	13	14	9	8	7	1	5	6	3	4	2
24	9	12	11	13	16	14	15	10	8	6	4	2	5	1	3	7
25	10	9	14	12	11	16	13	15	2	3	4	8	6	7	5	1
26	15	9	10	16	12	14	11	13	4	1	7	5	3	2	8	6
27	15	11	9	12	16	13	10	14	5	3	6	4	7	2	8	1
28	13	14	11	9	15	10	12	16	4	5	2	1	8	3	7	6
29	9	13	15	14	10	12	11	16	2	8	5	3	4	1	6	7
30	9	14	13	10	12	15	16	11	4	6	8	7	5	1	2	3

Scénarii amorçage contexte			Scénarii amorçage produit		
	Condition	Produit		Produit	Condition
1	Latino	Mojito	9	Mojito	Latino
2	Lounge	Whisky	10	Whisky	Lounge
3	Provençale	Pastis	11	Pastis	Provençale
4	Irlandaise	Bière	12	Bière	Irlandaise
5	Douche	Bière	13	Mojito	Usine
6	Usine	Mojito	14	Whisky	Voiture
7	Bureau	Pastis	15	Pastis	Bureau
8	Voiture	Whisky	16	Bière	Douche

Expérience 3 rapportée dans le chapitre 5**Tableau 56. Plan d'expérience utilisé pour l'expérience 3 rapportée dans le chapitre 5**

	Séance 1						Séance 2						Séance 3					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
S1	G+	P+	G-	J-	P-	J+	P+	G-	J+	G+	J-	P-	G+	P-	P+	G-	J+	J-
S2	G-	G+	P-	J+	J-	P+	G+	P+	G-	J-	P-	J+	P+	G-	J+	G+	J-	P-
S3	P+	J+	G+	P-	G-	J-	G-	G+	P-	J+	J-	P+	G+	P+	G-	J-	P-	J+
S4	J+	J-	P+	G-	G+	P-	P+	J+	G+	P-	G-	J-	G-	G+	P-	J+	J-	P+
S5	P-	G-	J-	P+	J+	G+	J+	J-	P+	G-	G+	P-	P+	J+	G+	P-	G-	J-
S6	J-	P-	J+	G+	P+	G-	P-	G-	J-	P+	J+	G+	J+	J-	P+	G-	G+	P-
S7	G+	P-	J+	G-	P+	J-	J-	P-	J+	G+	P+	G-	P-	G-	J-	P+	J+	G+
S8	J+	G+	P-	P+	J-	G-	G+	P-	J+	G-	P+	J-	J-	P-	J+	G+	P+	G-
S9	J-	P+	G-	J+	P-	G+	J+	G+	P-	P+	J-	G-	G+	P-	J+	G-	P+	J-
S10	P+	G-	J-	G+	J+	P-	J-	P+	G-	J+	P-	G+	J+	G+	P-	P+	J-	G-
S11	G-	J-	P+	P-	G+	J+	P+	G-	J-	G+	J+	P-	J-	P+	G-	J+	P-	G+
S12	P-	J+	G+	J-	G-	P+	G-	J-	P+	P-	G+	J+	P+	G-	J-	G+	J+	P-
S13	J-	P+	P-	G+	G-	J+	P-	J+	G+	J-	G-	P+	G-	J-	P+	P-	G+	J+
S14	J+	G+	J-	G-	P-	P+	J-	P+	P-	G+	G-	J+	P-	J+	G+	J-	G-	P+
S15	P-	J+	G-	P+	G+	J-	J+	G+	J-	G-	P-	P+	J-	P+	P-	G+	G-	J+
S16	P+	G-	J+	P-	J-	G+	P-	J+	G-	P+	G+	J-	J+	G+	J-	G-	P-	P+
S17	G-	J-	G+	J+	P+	P-	P+	G-	J+	P-	J-	G+	P-	J+	G-	P+	G+	J-
S18	G+	P-	P+	J-	J+	G-	G-	J-	G+	J+	P+	P-	P+	G-	J+	P-	J-	G+
S19	J-	G-	P+	G+	J+	P-	G+	P-	P+	J-	J+	G-	G-	J-	G+	J+	P+	P-
S20	P-	G+	J+	P+	J-	G-	J-	G-	P+	G+	J+	P-	G+	P-	P+	J-	J+	G-
S21	P+	J-	G-	P-	G+	J+	P-	G+	J+	P+	J-	G-	J-	G-	P+	G+	J+	P-
S22	G-	P+	J-	J+	P-	G+	P+	J-	G-	P-	G+	J+	P-	G+	J+	P+	J-	G-
S23	J+	P-	G+	G-	P+	J-	G-	P+	J-	J+	P-	G+	P+	J-	G-	P-	G+	J+
S24	G+	J+	P-	J-	G-	P+	J+	P-	G+	G-	P+	J-	G-	P+	J-	J+	P-	G+
S25	J-	P-	G+	G-	P+	J+	G+	J+	P-	J-	G-	P+	J+	P-	G+	G-	P+	J-
S26	P-	G-	P+	G+	J+	J-	J-	P-	G+	G-	P+	J+	G+	J+	P-	J-	G-	P+
S27	J+	J-	G-	P-	G+	P+	P-	G-	P+	G+	J+	J-	J-	P-	G+	G-	P+	J+
S28	G+	P+	J-	J+	P-	G-	J+	J-	G-	P-	G+	P+	P-	G-	P+	G+	J+	J-
S29	P+	J+	P-	J-	G-	G+	G+	P+	J-	J+	P-	G-	J+	J-	G-	P-	G+	P+
S30	G-	G+	J+	P+	J-	P-	P+	J+	P-	J-	G-	G+	G+	P+	J-	J+	P-	G-
S31	P+	G-	P-	G+	J-	J+	G-	G+	J+	P+	J-	P-	P+	J+	P-	J-	G-	G+
S32	G-	J-	J+	P-	P+	G+	P+	G-	P-	G+	J-	J+	G-	G+	J+	P+	J-	P-
S33	G+	P-	J-	G-	J+	P+	G-	J-	J+	P-	P+	G+	P+	G-	P-	G+	J-	J+
S34	J+	G+	G-	P+	P-	J-	G+	P-	J-	G-	J+	P+	G-	J-	J+	P-	P+	G+
S35	J-	P+	G+	J+	G-	P-	J+	G+	G-	P+	P-	J-	G+	P-	J-	G-	J+	P+
S36	P-	J+	P+	J-	G+	G-	J-	P+	G+	J+	G-	P-	J+	G+	G-	P+	P-	J-
S37	G-	J-	G+	P-	P+	J+	P-	J+	P+	J-	G+	G-	J-	P+	G+	J+	G-	P-

S38	P-	J+	G-	J-	G+	P+	G-	J-	G+	P-	P+	J+	P-	J+	P+	J-	G+	G-
S39	J-	P+	P-	J+	G-	G+	P-	J+	G-	J-	G+	P+	G-	J-	G+	P-	P+	J+
S40	J+	G+	J-	P+	P-	G-	J-	P+	P-	J+	G-	G+	P-	J+	G-	J-	G+	P+
S41	G+	P-	P+	G-	J+	J-	J+	G+	J-	P+	P-	G-	J-	P+	P-	J+	G-	G+
S42	P+	G-	J+	G+	J-	P-	G+	P-	P+	G-	J+	J-	J+	G+	J-	P+	P-	G-



Silence



Musique appréciée



Musique non appréciée

G-

Gateau MDD

G+

Gateau Marque nationale

J-

Jus MDD

J+

Jus Marque nationale

P-

Pâte MDD

P+

Pâte Marque nationale

Expérience rapportée dans le chapitre 6**Tableau 57. Plan d'expérience utilisé pour l'expérience rapportée dans le chapitre 6**

Sujet	Séance 1				Séance 2				Séance 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
S1	03	01	04	02	02	01	03		03	01	02	
S2	03	02	04	01	03	01	02		01	03	02	
S3	03	04	01	02	01	03	02		03	02	01	
S4	01	02	03	04	03	02	01		02	03	01	
S5	03	04	02	01	02	03	01		01	02	03	
S6	02	03	01	04	01	02	03		02	01	03	
S7	02	03	04	01	02	01	03		03	01	02	
S8	02	04	01	03	03	01	02		01	03	02	
S9	04	02	03	01	01	03	02		03	02	01	
S10	01	03	04	02	03	02	01		02	03	01	
S11	01	04	03	02	02	03	01		01	02	03	
S12	01	02	04	03	01	02	03		02	01	03	
S13	01	02	03		02	01	03		03	01	04	02
S14	02	01	03		03	01	02		03	02	04	01
S15	03	01	02		01	03	02		03	04	01	02
S16	01	03	02		03	02	01		01	02	03	04
S17	03	02	01		02	03	01		03	04	02	01
S18	02	03	01		01	02	03		02	03	01	04
S19	01	02	03		02	03	04	01	03	01	02	
S20	02	01	03		02	04	01	03	01	03	02	
S21	03	01	02		04	02	03	01	03	02	01	
S22	01	03	02		01	03	04	02	02	03	01	
S23	03	02	01		01	04	03	02	01	02	03	
S24	02	03	01		01	02	04	03	02	01	03	
S25	01	02	03		02	01	03		03	02	01	04
S26	02	01	03		03	01	02		02	01	04	03
S27	03	01	02		01	03	02		03	01	02	04
S28	01	03	02		03	02	01		01	04	02	03
S29	03	02	01		02	03	01		04	02	01	03
S30	02	03	01		01	02	03		02	04	03	01
S31	01	02	03		04	01	03	02	03	01	02	
S32	02	01	03		04	03	01	02	01	03	02	
S33	03	01	02		02	01	03	04	03	02	01	
S34	01	03	02		04	03	02	01	02	03	01	
S35	03	02	01		04	01	02	03	01	02	03	
S36	02	03	01		01	03	02	04	02	01	03	
S37	01	02	03		02	01	03		04	01	03	02
S38	02	01	03		03	01	02		04	03	01	02
S39	03	01	02		01	03	02		02	01	03	04
S40	01	03	02		03	02	01		04	03	02	01
S41	03	02	01		02	03	01		04	01	02	03
S42	02	03	01		01	02	03		01	03	02	04

S43	03	02	01	04	02	01	03	03	01	02
S44	02	01	04	03	03	01	02	01	03	02
S45	03	01	02	04	01	03	02	03	02	01
S46	01	04	02	03	03	02	01	02	03	01
S47	04	02	01	03	02	03	01	01	02	03



Silence

01

Mojito

02

Pastis



Ambiance congruente

03

Whisky

04

Contrôle



Ambiance non congruente

Annexe N° 2 : Réponses du test d'évocation de l'expérience 2 rapportée dans le chapitre 5

Tableau 58. Réponses au test d'évocation pour le choix des ambiances de l'expérience 2 rapportée dans le chapitre 5

Question	Sujet	Produits			
		Mojito	Pastis	Bière	Whisky
Qu'est ce que cette boisson vous évoque ?	1	Convivialité, fête, faire de la glace pilée et couper de la menthe, fraîcheur, bon, boisson de filles	Le sud et les marseillais qui boivent du pastis, l'anis (berk)	L'Allemagne, les soirees tranquille pas trop arrosées, les caps	De l'alcool vraiment fort, pour les mafiosos
	2	Les moustiques	Marseille	La fin du boulot (je bois souvent une bière en rentrant chez moi)	Les arômes complexes
	3	Le film Miami Vice de Michael Mann	Apéro barbecue devant téléfoot un dimanche matin	Un truc de bois sans soif	Le mot anglais whisky vient du celtique uisge en gaélique écossais ou de « uisge » en gaélique irlandais. Le terme signifie simplement « eau » dans les deux langues ; c'est « uisge beatha » en gaélique écossais et « uisge beatha » en irlandais qui signifient « eau de vie » — et donc whisky en anglais.
	4	Cette boisson m'évoque une ambiance latino , le soleil, la chaleur, la menthe, le rhum, la salsa.	Cette boisson m'évoque le Sud-est de la France , la pétanque , le nombre 51, le « ptit jaune », l'anis, la couleur typique jaune clair	Cette boisson m'évoque l'amertume, le pétillant, des couleurs (brune, blonde et blanche), une musique rock ou irlandaise	Ca m'évoque une boisson forte et le coca-cola
	5	Amérique du sud , exotisme, rhum, ivresse rapide, fête, vacances	Le sud de la France , les vacances, l'été, les cigales , l'anis	Le nord, les chtis. La boisson « passe partout », populaire.	Irlande, hiver, coin du feu, boisson « d'homme » , de connaisseurs, avec un cigare
	6	Menthe, Glace pilée, Cuba	Anis, soleil	Dégustation, arômes, amertume, Boisson courante, Apéritif	Alcool fort , Irlande,

Dans quel contexte/endroit imagineriez-vous bien sa consommation ?	7	Amérique latine. Pas grand-chose de plus, car je n'ai jamais goûté cette boisson... Sans doute assez alcoolisé	Le Sud de la France, le soleil, les bonbons à l'anis, la pétanque. Soirées festives au camping au bord de la Méditerranée. Odeur très marquée et écœurante à haute dose (...).	Le Nord de la France. Les soirées étudiantes, les bars à bière. Les matchs de foot. Boisson plutôt masculine sauf quand il s'agit de bière aromatisée. Boisson alcoolisée qui coûte moins cher que d'autres alcools. Plutôt pour les populations jeunes.	Le capitaine Haddock... Alcool fort (trop). Plutôt masculin et plutôt pour une population un peu plus âgée. Goût pas terrible... Whisky Coca : plutôt pour les populations plus jeunes, à usage festif.
	8	Le rhum, la menthe, Cuba...J'associe le Mojito à la Fraîcheur.	Marseille, la pétanque, la mer, le camping.	Irlande, jeunesse.	Caractère, prestige.
	9	Espagne soirée potes	Marseille, cuite de mon mari, anis, sud	Rafraichissant, sport, apéro terrasse	Cuite de jeunesse
	1	En terrasse, en boîte, dans un bar, chez des amis	Dans un bar ouvert l'après midi dans le sud	Pendant une soirée tranquille à deux ou trois, ou le « pizza bière » devant un match de foot	Dans des diners très classes, ou les hommes s'isolent pour boire un whisky avec leur cigare, ou en whisky coca
	2	En soirée	Nulle part, je n'aime pas ça	Chez moi, dans un bar	Chez moi
	3	Cuba	A Marseille	Partout pour n'importe quelle raison	Quand on veut faire le papa
	4	Boisson phare qu'on boit dans des bars latinos ou branchés/lounge.	Dans un bar « traditionnel » français type PMU	Dans un bar à bière, dans un bar irlandais, dans un bar traditionnel type PMU	Dans un bar traditionnel type PMU, dans une soirée open-bar d'école d'ingénieur
	5	Comme apéritif au restaurant, ou cocktail dans un bar. Dans un pays d'Amérique du sud, dans les îles.	Sur la terrasse, à l'apéro, en attendant que les grillades cuisent !	Un peu tout le temps : apéro, repas, soirée, après-midi	Le soir, avant ou après le repas, près de la cheminée.
	6	A une fête, dans un bar	Été, Apéritif, Convivialité	Chez soi, Bar, Restaurant	Chez soi, bar, entre amis, dans un bar de dégustation

7	Dans un bar , restaurant Mexicain .	Au camping, pendant les vacances, à l'apéro en terrasse.	A la maison, devant la télé. Ou dans un bar . Plutôt boisson à boire en dehors des repas.	Pour ceux qui en consomment pur, plutôt à la maison avant le repas. Pour ceux qui le consomment avec du coca, plutôt au cours de soirées festives.
8	Un bar avec une ambiance chaude, de la salsa , de la musique entraînante des îles.	A la maison, en famille à l'apéritif.	Soirées entre amis, dans un Pub Irlandais .	Dans un bar très chic lors d'une rencontre d'affaires.
9	Maison, bar	Aucun, je n'aime pas	Terrasse café au soleil	jamais

Annexe N° 3 : Questionnaire finale de l'expérience 2 rapportée dans la chapitre 5 et de l'expérience rapportée dans le chapitre 6

1. Comment appréciez-vous ces produits ?

Je n'apprécie pas du tout ce produit	MOJITO									J'apprécie beaucoup ce produit
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Je n'apprécie pas du tout ce produit	PASTIS									J'apprécie beaucoup ce produit
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Je n'apprécie pas du tout ce produit	WHISKY									J'apprécie beaucoup ce produit
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

2. Quelle est votre fréquence de consommation de ces produits ?

	MOJITO	PASTIS	WHISKY
Plusieurs fois par semaine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Une fois par semaine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Plusieurs fois par mois	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Une fois par mois	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Plusieurs fois par an	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Une fois par an	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Jamais	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3. Qu'est-ce que ces produits vous évoquent ?

MOJITO	PASTIS	WHISKY

4. Comment apprécier vous ces ambiances ? (Vous pouvez les réécouter)

Je n'apprécie pas du tout cette ambiance

AMBIANCE LATINO									
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AMBIANCE PROVENCALE									
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AMBIANCE IRLANDAISE									
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AMBIANCE BUREAU									
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AMBIANCE DOUCHE									
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
AMBIANCE TRANSPORT									
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

J'apprécie beaucoup cette ambiance

5. Merci d'indiquer selon vous la pertinence des associations présentes dans le tableau ci-dessous, selon la notation indiquée

- 0 : Pas du tout pertinent
 1 : Peu pertinent
 2 : Moyennement pertinent
 3 : Pertinent
 4 : Très pertinent

	AMBIANCE LATINO	AMBIANCE PROVENCALE	AMBIANCE IRLANDAISE	AMBIANCE BUREAU	AMBIANCE DOUCHE	AMBIANCE TRANSPORT
MOJITO						
PASTIS						
WHISKY						

Questionnaire de recrutement

-
Tests d'eye tracking à Paris
du Mardi 21 Mai au Jeudi 6 Juin 2013

Cible à interroger :

Hommes et femmes,

Habitant Paris intra-muros (cela vous convient ?),

Age : 18 ans et plus ? Ou y a-t-il une autre tranche d'âge à considérer ?

Sur les 42 testeurs, combien de personnes faut-il recruter dans chaque tranche d'âge ?

Par exemple, combien de 18-24 ans / combien de 25-39 ans / combien de 40 ans et plus ?

Q1. Vous-même travaillez-vous (ou avez-vous travaillé) ou quelqu'un de votre entourage travaille-t-il (ou a-t-il travaillé) dans l'un des secteurs suivants ?

Plusieurs réponses possibles

La publicité

Le domaine de la santé

L'informatique / le web

Les relations publiques

La fabrication ou distribution de boissons

La banque, les assurances

Le graphisme

Le high-tech

Le marketing

Les études de marché

La recherche pharmaceutique

La communication

L'industrie agroalimentaire

Les médias (radio, TV, presse)

L'équipement de la maison

La téléphonie

L'hygiène beauté

La psychologie

La grande distribution (hypermarchés / supermarchés)

Le bricolage

Le journalisme

Aucun de ces secteurs

SI L'UN DES SECTEURS EN GRAS EST COCHE : SORTIE

Q2. Quand avez-vous participé pour la dernière fois à un entretien individuel ou une table ronde dans le cadre d'une étude de marché ?

Je n'y ai jamais participé **ALLER EN Q4**

Au cours des 6 derniers mois **SORTIE**

Il y a entre 6 mois et 1 an

Il y a plus d'un an **ALLER EN Q4**

Q3 - Avez-vous participé dans les 12 derniers mois à une étude (entretien individuel, table ronde) sur l'un des thèmes suivants ?

Plusieurs réponses possibles

L'équipement de la maison

La téléphonie

L'hygiène beauté

La banque, les assurances

Le high-tech

Les produits alimentaires **SORTIE**

L'informatique / le web

Non, sur aucun de ces thèmes

Q4 - Qui réalise régulièrement les achats alimentaires pour votre foyer ?

Vous-même

Autant vous-même qu'une autre personne

Une autre personne **SORTIE**

Q5 – Parmi les produits suivants, quels sont ceux que vous CONSOMMEZ PERSONNELLEMENT ? Et à quelle fréquence?

Une seule réponse possible par ligne

	Régulièrement	Occasionnellement	Jamais
Pâte à tartiner au chocolat			
Lait (froid ou chaud)			
Confiture			
Gâteaux fourrés aux fruits (de type Savane ? en part individuelles ou pas forcément ?)			
Yaourts nature			
Fruits			
Jus d'orange			
Fromage			
Oeufs			
Café			

AU MOINS UNE DES CASES EN GRIS DOIT ETRE COCHEE, SINON SORTIE

Les testeurs doivent consommer occasionnellement ou régulièrement **LES 3 PRODUITS** ou **AU MOINS L'UN DES 3 PRODUITS** ?

Pour les 42 testeurs, y a-t-il une répartition à respecter selon les 3 produits ?
Ou ce n'est pas nécessaire ?

Q6 - Etes-vous myope ?

Oui

Non **ALLER EN Q8**

Q7 - Avez-vous déjà eu recours à de la chirurgie pour votre myopie ?

Oui **SORTIE**

Non

Q8 - Portez-vous des lentilles de contact ?

Oui **A EXCLURE ?**

Non

Q9 - Quelles sont les musiques que vous aimez ?

Veillez citer 10 interprètes et titres de chansons

Interprète 1 :

Chanson 1 :

Interprète 2 :

Chanson 2 :

Interprète 3 :

Chanson 3 :

Interprète 4 :

Chanson 4 :

Interprète 5 :

Chanson 5 :

Interprète 6 :

Chanson 6 :

Interprète 7 :

Chanson 7 :

Interprète 8 :

Chanson 8 :

Interprète 9 :

Chanson 9 :

Interprète 10 :

Chanson 10 :

Q10 - Quel est (ou quels sont) le(s) interprète(s) que nous n'aimons pas ?

.....
.....
.....

Q11 - Quel est (ou quels sont) le(s) style(s) de musique que nous n'aimez pas ?

.....
.....
.....

Q12. Quelle est votre catégorie socioprofessionnelle ?

Agriculteur
Artisan, commerçant, chef d'entreprise
Profession libérale
Cadre ou profession intellectuelle supérieure
Profession intermédiaire
Agent de maîtrise
Technicien
Employé
Ouvrier
Etudiant **ALLER EN Q13**
Retraité
Demandeur d'emploi
Homme ou femme au foyer **ALLER EN Q13**

Q12BIS. Quelle est votre profession actuelle ou quelle était la dernière profession que vous avez exercé (fonction / poste occupé) ?

.....

Q12TER. Dans quel secteur d'activité travaillez-vous (avez-vous travaillé) ?

.....

Q13. Quelle est votre situation familiale ?

Je vis en couple sans enfants au foyer
Je vis en couple avec enfants au foyer
Je vis seul(e) sans enfants au foyer **ALLER A LA CONCLUSION**
Je vis seul(e) avec enfants au foyer **ALLER EN Q15**

Q14. Quelle est la catégorie socioprofessionnelle DE VOTRE CONJOINT(E) ?

Agriculteur
Artisan, commerçant, chef d'entreprise
Profession libérale
Cadre ou profession intellectuelle supérieure
Profession intermédiaire
Agent de maîtrise
Technicien
Employé
Ouvrier
Etudiant **ALLER EN Q15**
Retraité
Demandeur d'emploi

Homme ou femme au foyer **ALLER EN Q15**

Q14BIS. Quelle est LA profession actuelle DE VOTRE CONJOINT(E) (ou quelle était la dernière profession qu'il (elle) a exercé (fonction / poste occupé) ?

.....

Q14TER. Dans quel secteur d'activité travaille-t-il (elle) (ou a-t-il (elle) travaillé) ?

.....

Q15. Combien avez-vous d'enfants vivant au sein de votre foyer ?

Aucun **ALLER A LA CONCLUSION**

1 enfant

2 enfants

3 enfants

4 enfants et plus

Q16. Quel âge a (ont) votre (vos) enfant(s) vivant au sein de votre foyer ?

Plusieurs réponses possibles

Moins de 8 ans

De 8 ans jusque moins de 13 ans

De 13 ans jusque moins de 16 ans

De 16 ans jusque moins de 18 ans

18 ans et plus

CONCLUSION :

Nous vous remercions d'avoir répondu à notre questionnaire.

Nous organisons prochainement des entretiens individuels à Paris.

Il s'agit de participer à **3 SEANCES DE 45 MINUTES** à Paris, entre le Mardi 21 Mai et le Jeudi 6 Juin (inclus), entre 9h00 et 20h00.

LES 3 SEANCES SONT OBLIGATOIRES.

Les participant(e)s seront remercié(e)s par un chèque cadeau multi enseignes d'un montant de 60,00 €, qui leur sera envoyé par courrier après la 3^{ème} séance.

Etes-vous disponible et acceptez-vous de participer à CES 3 SEANCES DE TESTS ?

Plusieurs réponses possibles

Oui, je suis disponible POUR CES 3 SEANCES DE 45 MINUTES plutôt entre 9h00 et 12h00

Oui, je suis disponible POUR CES 3 SEANCES DE 45 MINUTES plutôt entre 12h00 et 14h00

Oui, je suis disponible POUR CES 3 SEANCES DE 45 MINUTES plutôt entre 14h00 et 18h00

Oui, je suis disponible POUR CES 3 SEANCES DE 45 MINUTES plutôt entre 18h00 et 20h00

Non, je ne suis pas disponible

Nous vous remercions d'avoir répondu à ces questions.

Vous allez recevoir un mail de confirmation avec les dates des 3 séances de tests, l'adresse des tests ainsi qu'un plan d'accès.

NOM : _____ **PRENOM :** _____

ADRESSE : _____

CODE POSTAL : _____ **VILLE :** _____

TEL DOMICILE : [_____] **TEL PORTABLE :** [_____]

ADRESSE E-MAIL : _____ **@** _____

Annexe N°5 : Screener de recrutement réalisé par BIOFORTIS pour l'expérience rapportée dans le chapitre 6

Renseignements consommateur			
Nom , Prénom		N° dégustateur	
Date		Heure	

Cible : N=40 ; 1/3 d'hommes (n=13), 2/3 femmes (N=27) ; 18-65 ans (répartition équilibrée)

A exclure : personnes ayant eu recours à la chirurgie de la myopie ou toute autre chirurgie de l'œil et les personnes portant des lentilles de verre (ou alors, leur préciser de venir avec leurs lunettes)

Bonjour,

Biofortis, un institut spécialisé dans les tests consommateurs, conduit actuellement une étude auprès de personnes âgées de 18 à 65 ans. Merci de répondre aux questions suivantes afin de déterminer si vous êtes qualifié pour participer à cette étude.

Vérification genre :

1. HommeQuota 1/3
2. FemmeQuota 2/3

Q1. Vous-même (ou quelqu'un de votre famille ou de votre entourage) travaillez-vous (travaille-t-il) dans l'un des secteurs suivants ?

1. Publicité.....Stop
2. Etudes de marché.....Stop
3. Relations publiques / Radio / TV / journauxStop
4. Industries alimentaires / industries proches de la catégorieStop
5. Aucun de ceux-ci **Continuer**

Q2. Quelle est votre activité professionnelle? (une seule réponse possible)

1. Agriculteur, ouvrier agricole
2. Profession indépendante (artisan, commerçant, chef d'entreprise...)
3. Cadre supérieur (cadre de la fonction publique, administratif, professeur, ingénieur)
4. Profession intermédiaire (encadrement et techniciens)
5. Employé
6. Ouvrier
7. Retraité
8. Demandeur d'emploi
9. Etudiant / enfant
10. Au foyer

Q3. Quel âge avez-vous? (Une seule réponse possible)

Saisir l'âge exact

Si < 18 ans ou > 65 ans, STOP

Q4. Durant ces 12 derniers mois, à combien de tests consommateurs avez-vous participé ? (réponse spontanée)

1. 5 tests ou plus STOP
2. Moins de 5 tests

Q5. Comparativement à la plupart des personnes, vous diriez que votre sens de l'odorat est ... (Une seule réponse possible)

1. Bien meilleur que la moyenne
2. Légèrement meilleur que la moyenne
3. Dans la moyenne
4. Légèrement moins bon que la moyenne
5. Bien moins bon que la moyenne STOP

Q6. Avez-vous des troubles auditifs ? (Réponse spontanée)

1. Oui STOP
2. Non Continuer

Q7. Avez-vous déjà subi une chirurgie des yeux (chirurgie réfractive – correction myopie, hypermétropie..., chirurgie médicale – cataracte, strabisme, glaucome....) (Réponse spontanée)

3. Oui STOP
4. Non Continuer

Q8. Parmi les corrections des yeux suivantes, lesquelles portez-vous ? (Une seule réponse possible)

1. Je porte des lunettes
2. Je porte des lentilles souples
3. Je porte des lentilles rigides **La personne devra porter ses lunettes le jour du test**
4. Je ne porte ni lentilles ni lunettes

Q9. Parmi les catégories de produits suivants, lesquels n'achèteriez-vous jamais ?

1. Des Sodas
2. Des boissons à base de lait
3. Des boissons Alcoolisées Stop
4. Des boissons à base de fruits

Si « convoquer » :

INVITATION

Vous participerez à une étude sur des odeurs.

Ce test de 3 visites d'une durée de 30 min chacune a lieu le àh, dans nos locaux.

Nous vous informons que :

- *Nous refuserons tout consommateur ayant du retard à ce test.*
- *Nous refuserons tout consommateur dans l'incapacité de nous présenter une pièce d'identité (permis de conduire, carte d'identité ou passeport) si un contrôle est réalisé.*
- *Merci de venir non parfumé et sans rouge à lèvres*
- *Merci de ne pas boire ou manger quelque chose de fort et de ne pas fumer 1h avant le test*

Si « stop » :

Merci d'avoir répondu à ces questions ; malheureusement, vous ne correspondez pas aux critères requis pour ce test.

Nous ne manquerons pas de vous rappeler pour une prochaine étude.



2014 ■ vol. 10 ■ no. 2

Pupillometry of taste: Methodological guide – from acquisition to data processing - and toolbox for MATLAB

Anaïs Lemerrier ^{a,b,c,d}, Geneviève Guillot ^a, Philippe Courcoux ^c, Claire Garrel ^a, Thierry Baccino ^{c,d}, Pascal Schlich ^b

^a Centre de Recherche Pernod Ricard, France;

^b INRA, UMR1324 Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, France;

^c CHART/LUTIN (EA 4004), Cité des sciences et de l'industrie, France;

^d Université Paris VIII, France ;

^e ONIRIS, Unité de Sensométrie et Chimiométrie, Nantes, F-44322, France

Abstract – The food sensory science community has recently shown an increasing interest towards the measurement of emotions induced by product consumption. In this paper, we propose a standard method to objectively and quantitatively explore emotions in tasting situations through measurement and analysis of pupil diameter. Pupillometry is a well-known method for investigating cognitive load and emotional effects. However, since a standard method to analyze pupil response data is lacking, we provide here a guided methodology, from data acquisition to data processing. An example of an application is also provided. The advantages and major drawbacks of this method are discussed.

Keywords – Pupillometry, tasting, methodology, toolbox for MATLAB

anaïs.lemerrier@gmx.com

Introduction

Pupil studies have been used in psychology for many years. In her seminal work, Loewenfeld (1993) provides a history of pupil use in psychology, including research about voluntary pupil movements in the 18th century, "conditioned" and "orienting" reflexes at the beginning of the 20th century, and "attitude," "interest," etc., taken up by Hess in the 1960s. Since the 1960s, various pupillometry studies examined cognitive and emotional stimuli. Researchers have reported that pupil size is correlated to levels of cognitive effort (Hess & Polt, 1966; Bradshaw, 1968; Ullwer, Ries, Foth, & van der Meer, 2010), and to emotional load or preferences (Barlow, 1969; Partala & Surakka, 2003; Bradley, Miccoli, Escrig, & Lang, 2008; Laeng, 2010). Other types of stimuli or tasks have also been investigated, including memory processing (Laeng, 2010; Sirois & Jackson, 2010; Wu, Laeng, & Magnussen, 2010) and violation of expectations in infants (Gredebäck, 2010; Hepach & Westermann, 2010). Pupils also dilate consecutively to stimuli causing emotion such as fear, pain, and shock, as well as stress and fatigue (Wilhelm & Wilhelm, 2010). The bulk of empirical work suggests that pupil diameter varies according to cognitive and

emotional loads. However, the pupillometry method is recent and a standard method to analyze pupil response data has not yet been developed.

Pupillary diameter is known to vary from 1.7-2.2 mm in myosis (constriction of the pupil), to 7.5-8 mm in mydriasis (dilation of the pupil; Rouvière & Delmas, 1981; Larmande & Larmande, 1989). For several decades now, sophisticated pupillometry video equipment, based on infrared technology, has been used to estimate diameters to the hundredth of a millimeter (Lowenstein & Loewenfeld, 1958; Loewenfeld & Rosskoth, 1974), and current systems have a resolution better than 0.025 mm in diameter on individual measurements, at rates of 60 Hz and even up to 240 Hz (Granholm & Steinhauer, 2004).

Over time, many different studies have used different number of participants (n) and different ways to pre-process (smoothing, blink replacement and baseline) and process (time window, dependent variable, statistical tests and graphical representation) pupil response data (Table 1). However, due to the lack of any standardization, particularly for data pre-processing, comparisons between data are not always



possible and meta-analyses are not advisable.

The sensory community has recently shown increased interest towards the measurement of emotions induced by product consumption or usage. Since emotions affect food preferences and choices, this community has an interest in evaluating emotions related to products. Until now, emotions have been mainly measured by questionnaires or assessment scales such as the EsSense Profile™ of King, Meiselman, and Carr (2010). This questionnaire consists of 39 feeling items for a subject to rate from "Not at all" (1) to "Extremely" (5). Other questionnaires have been used for perfumes or, more widely, for odors (Chrea et al., 2009; Porcherot, 2010; 2012; Ng, Chaya, & Hort, 2013). This type of questionnaire, especially when used for food products, must be adapted to each product and must provide a subjective measurement of emotions, which may lead to additional large between- and within-subject variations.

Since human pupil size is directly affected by emotional stimuli, pupil size changes due to product responses could be used as an objective and unbiased (it is involuntary) measure of emotions provoked by tasting a product. However, although human pupil size is directly affected by emotional stimuli, almost no data exists about the effect of olfactory, gustatory and trigeminal stimuli on pupil dilation or constriction. To our knowledge, only two papers about this type of stimuli have been published. Hess and Polt (1966) showed that changes in pupil size could be a measure of taste difference. More than 40 years later, Schneider and colleagues (2009) showed that changes in pupil diameter indicated differences between the modalities and the strength of odor stimuli, but were not related to the hedonic value of odors.

Through this paper, we aim to propose a standard method to objectively and quantitatively explore emotions in tasting situations through the measurement of pupil dilation. The hypothesis is that when humans feel emotions while tasting a product, their pupils will dilate. We thus provide a procedure of data acquisition, data pre-processing, and data processing, and then conclude with an example of an application. We have also attached three MATLAB routines to this paper that we used to help us carry out these analyses.

Data Acquisition

Participants

In previous work, the number of participants in pupillometry studies has greatly varied. A sample of 20 references (Table 1 at the end of the article) revealed a minimum of ten, a maximum of 45, an average of 24, and a median of 21 participants. Based on this observation, samples of 20 to 24 participants seemed to be optimal for effect sizes associated with pupil diameter. Moreover, based on our mean observations, to obtain a test power of 90% with $\alpha = 0.05$, an average sample size of 23 participants would be required for detecting significant pupil dilation of approximately 0.09 mm, corresponding to a percentage change of 2.4%. To conclude, a minimum of 23 participants is recommended.

Experimental setup

We used a Tobii T60 eye tracker (60 Hz sampling rate) for our purposes. This device is designed for tracking eye movements as well as assessing pupil diameter. We propose guidelines for conducting a pupillometry study, some of which are specific to the product tasting situation when using an on-screen eye tracker. First, it is necessary to control the brightness to avoid bias due to the light. For this, we recommend using an artificial light as uniformly as possible in the testing room, and to keep it constant between participants. Second, the participant's movements (head, arms) must be controlled. In fact, movements can disrupt the signal (disturbance of IR beams) or provoke dilation or contraction if the room is not uniformly lighted. Consequently, the subject must consume the product without any head movement. For example, when working with a liquid product, the container must be filled almost to the top, allowing the subject to take a sip without moving his or her head. Use of a straw could further help when it is appropriate.

Task, Stimulus Material and Procedure

Task.

The task can be divided into three periods for each stimulation.

Rest period. The rest period consists of measuring the pupil diameter while the subject is not receiving any stimulus. This measurement serves as the baseline.

Measurement period. The measurement period consists of measuring the specific reaction of the pupil to a



stimulus, or the natural pupil variation if there is no stimulus.

Rinsing period: The rinsing period is a rest period for the subject's eyes, during which the subject has only to rinse his or her mouth with water without watching the screen.

Stimulus material & room test.

To determine the best room lighting conditions and the display to be used, we conducted an experiment to test these two factors (light and screen), each with two modalities (ceiling light (100-lux)-spotlight (50-lux) and gray screen (30 cd/m²)-black screen (0.30 cd/m²), respectively).¹ Illuminance for both light conditions was measured at the approximate position of the participant's eyes when facing the monitor. Results showed a percentage of missing values that were higher for the black screen ($M=12.6$, $SD=2.3$) than for the gray screen ($M=4.6$, $SD=1.0$) [$F(1,160)=10.63$, $p=0.001$, $\eta^2=0.04$], and higher for the spotlight ($M=11.9$, $SD=2.3$) than for ceiling light ($M=6.1$, $SD=1.1$) [$F(1,160)=7.20$, $p=0.008$, $\eta^2=0.03$]. A significant interaction between light and screen [$F(1,160)=3.89$, $p=0.050$, $\eta^2=0.02$] showed that for the light effect depending on the screen, the percentage of missing values is lower for ceiling light with the black screen alone, whereas the percentage of missing values is equivalent for both light conditions with a gray screen. In conclusion, the best conditions among those tested were ceiling light (100-lux) and a gray screen (30 cd/m²). It is recommended that the experimenter carry out a similar pilot test in order to validate his/her experimental conditions.

Displays are presented for each period using Tobii Studio experimental control software. The displays differ depending on the period. For the rest and measurement periods of the main test, the displays have to be identical and neutral. We recommend using a gray screen on which a black cross appears to facilitate the subject's concentration on the screen. A

¹ 15 participants were recruited for this experiment. Each participant realized three trials in each condition. Each trial consisted of three phases. Firstly, a gray or black fixation cross appeared respectively on the black or gray screen for 2 s to adapt the participant to the experimental conditions, the subject was not receiving any stimulus. Then, the subject took a sip of water while the same fixation cross appeared for 3 s. Then, participants had 20 s to rest before the next trial starts. The percentage of missing values was collected during the second phase.

gray screen was preferable to a black screen because of the results reported above. The cross displayed on the screen must be fixed to avoid the influence of gaze position on pupil size measurement (Gagl, Hawelka and Hutzler, 2011). The display for the rinsing period is clear since no measurement is made during this period. However, it is also recommended to use a gray screen to avoid an excessive change of luminance. We recommend limiting the rest periods to 1 s and the measurement periods to 3 s. A model of a Tobii Studio project is available on the journal's web site to this paper (Pupillometry Test_example.nas).

Procedure.

The subject sits on a chair in such a way that his or her face is 60 cm from the screen. The procedure is conducted in four steps:

1. Explanation of the test session and statement of instructions by the experimenter

We recommend that the experimenter give the instructions to the subject orally rather than having the subject read them on the screen. The instructions have to be identical for all subjects.

2. Calibration of the eye tracker

The calibration phase, for which the apparatus provides a specific procedure, aims to adapt parameters of the eye gaze and pupil estimation algorithms to the idiosyncratic properties of each participant's eyes. The calibration has to be carried out at the beginning of each session. If it does not work, the data cannot be recorded and the participant has to be excluded.

3. Trial runs

The third step consists of running several training trials to verify that the subject understands the instructions.

4. Measurement(s)

The experimenter notes each time the subject takes a mouthful or a sip of the product in order to capture the initial time of the stimulus exposure.

Participant pre-selection.

The participants can be pre-selected before the experiment begins, keeping certain conditions in mind. Some people cannot participate in a pupillometry test because of their pupil size (either too large or too small), because they have strabismus, have had laser surgery, etc. To establish the pre-selection method, we determined what an unusual percentage of missing values is on the basis of our last observations of 25



2014 ■ vol. 10 ■ no. 2

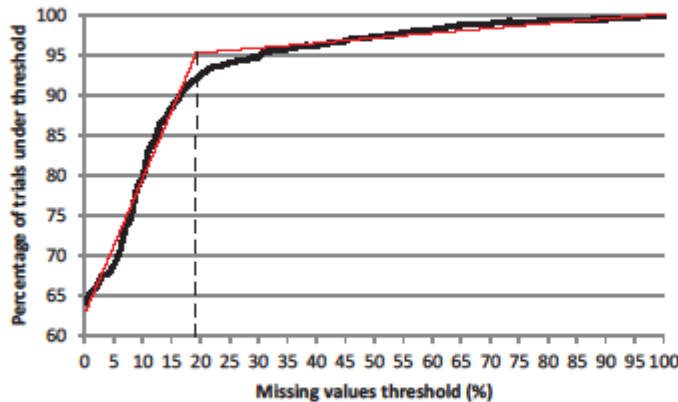


Figure 1 ■ Percentage of trials under successive fixed thresholds of missing values from 0 to 100%

participants, with light optimized conditions (ceiling light (100-lux) and a gray screen (30 cd/m²)). Twenty-eight trials were done per participant (25 participants * 28 trials = 700 trials). First, the average percentage of missing values was calculated per trial, with an average over trials of approximately 5.90% (SD = 0.50). The percentage of trials under successive fixed thresholds of missing values from 0 to 100% was then observed (by the calculation step by step of the percentage of trials with less than 1%, 2%, 3%, until 100% of missing values) (Figure. 1). An inflection point observed at 18% seems to transcribe the border between the usual (standard) and the unusual percentage of missing values with more than 91% of trials with less than 18% of missing values. Based on these observations, we chose to fix a threshold of 18% of missing values beyond which the value could be considered as unusual. Experimenters could choose to use the same threshold or to determine it by carrying out a similar pilot test in order to determine the usual percentage of missing values in their fixed experimental conditions. For the pre-selection, each participant's pupil diameter has to be measured during a short test. The percentage of missing values is then calculated. We recommend not selecting participants with a higher percentage of missing values than the fixed threshold. A MATLAB routine, available on the journal's web site, is proposed to identify the percentage of missing values in the data in order to help make the decision (DataPreSelect.m).

Data Pre-processing

Data Extraction

From the raw data, which is a continuous stream of pupil size estimates, the size of which being a function of sampling rate and task duration, specific pupil responses need to be retrieved for each stimulus. The variables of interest are time, left and right pupil sizes, and event. Depending on the device, a validity index of each measurement or equivalent could also be retrieved (these reflect the estimated validity of individual samples). Given that the latency of pupillary reaction is 200-250 milliseconds (Rougier & Riss, 2000) and, on the basis of our observations, the ending time of a specific reaction is one to two seconds, we recommend observing the results over a period of 2.5 seconds from stimulus onset. Finally, data are retrieved as well for up to one second before stimulus onset, for baseline correction (explained later).

Cleaning Data

Regardless of the eye tracking device used, gaze-loss samples are unavoidable (i.e., from eye blinks). Depending on the device, each missing value is arbitrarily recorded as a default value or deleted by the experimental control software, and then estimated by regression or interpolation. However, too many missing values could affect the signal quality. We recommend keeping only recordings with less than 18% of missing

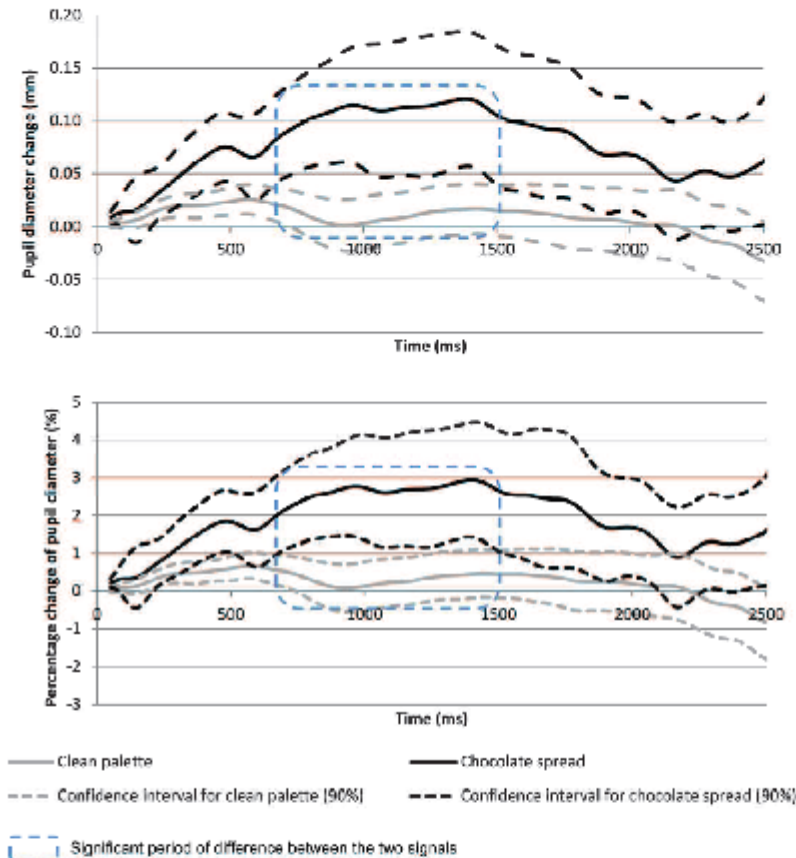


Figure 2 ■ Mean pupillary responses after ingestion of spread and during clean palette

values to ensure reliable results, as already suggested for participant pre-selection.

According to Jackson and Sirois (2009), missing values from breaks should first be estimated before running analyses. If a missing value occurs on one eye only, the sample could be estimated by the value of the other eye since there is a high correlation ($> .9$) between left and right pupil diameters. Otherwise, a linear interpolation could be drawn from the average of the last three values before and the first three values after the break in samples. Jackson and Sirois (2009) developed a MATLAB function to interpolate missing samples, which we have available on the journal's web site (DataCleanLR.m). This function first filters the data

to prevent an increase in variability using a low-pass digital filter. We chose a 10-point average filter (166.67 ms) to be near the average of our observations, based on values found in the literature (average = 169.59 ms - Table 1). Data are then interpolated. Finally, pupil data from both eyes at each sample time are averaged. This data cleaning is carried out on data as of 1 s before the stimulus and up to 2.5 s after the stimulus.

Baseline Correction

To allow the elimination of inter-subject variability in terms of pupil size, as well as the elimination of a residue of previous pupillary reaction, data were corrected by removing a baseline from each data point.

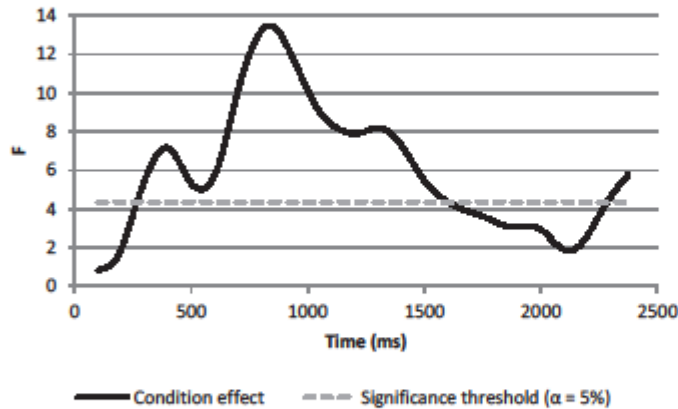


Figure 3 ■ F value for condition variable over time

The baseline was defined as the average pupil size of the interval from -200 ms to 0 ms to stream onset, in keeping with values commonly found in the literature (Kuchinke et al., 2007; Vö et al., 2008; Borneman et al., 2010; Raisig et al., 2010; Kuchinke et al., 2011; Prehn et al., 2011; Wierda et al., 2012). This reference value represents the pupil size at time t_0 . The results could be expressed in two ways: (i) baseline-corrected pupil diameter in mm using the following equation: $X_{\text{change}} = X_{\text{data}} - \text{baseline}$; and (ii) percentage change of pupil diameter using the following equation:

$$\% \text{change} = \frac{X_{\text{data}} - \text{baseline}}{\text{baseline}} \times 100.$$

We recommend expressing the results of both of these formulas to make it possible to compare data with those from previous studies. However, in the case of statistical tests, it is recommended to use only the percentage change of pupil diameter, which allows for the elimination of additional inter-individual variability.

A MATLAB routine for selecting, cleaning, and correcting data is available on the journal's web site (DataPreprocess.m) (for more details, see the document referred to as "#Readme", attached to the routine).

Data Processing

All of the data processing methods presented below have one of the following two objectives: (i) comparing

a product to a control situation in order to know if there is a significant dilation of the pupil; (ii) comparing two or more products in order to know if there is a difference between them in terms of pupil dilation.

Curve

The curve method of analysis can respond to the two objectives, and consists of representing pupil diameter evolution over time. A confidence interval (CI) can be added to the curves to make them more informative, highlighting periods when there seems to be a significant difference. We used a 90% CI. It is less rigorous than the usual value of 95%, and may be justified by the variability in the measurement of pupil response. These CIs are used for a first visual interpretation. Two pupil responses to stimuli are considered to be equivalent when the CI curves overlap. Conversely, when the two CI curves do not overlap, the two responses are different, and the direction of this difference can be seen on the plot. If a large number of stimuli are plotted on the same graph, it is not recommended to draw CI boundaries; a complementary method, described later, will clarify the significance of differences from one time to the next.

Peak Dilation

The peak dilation method can be used to compare two or more products. Peak dilation is computed as the maximum percentage of pupil diameter change. This peak dilation is submitted to a two-way ANOVA with stimulus and subject as factors.

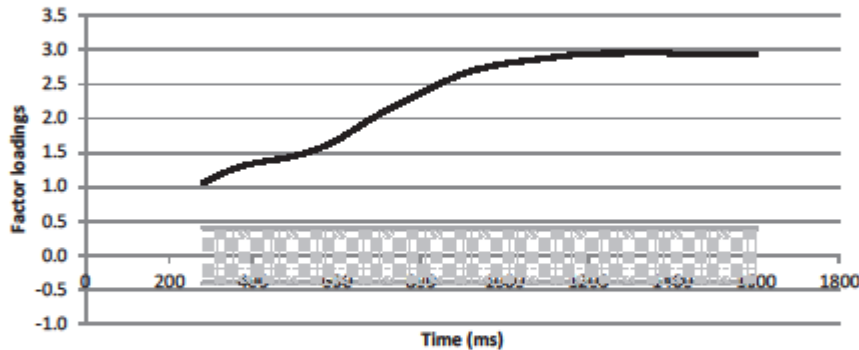


Figure 4 ■ Factor loadings of the first component identified by PCA analysis (91.33% of the overall variance) - Horizontal lines at -0.4 and 0.4 indicate the border of factor loadings, which are considered to be "meaningful"

Comparison of stimuli by Mobile Average over time

This consists of comparing the mean pupil diameter in successive time windows. Moving averages over 200 ms of the percentage change from the baseline are computed. These averages are compared between stimuli by performing a two-way ANOVA with stimulus and subject as factors. To visualize the differences between stimuli, the statistic F of the stimulus factor is plotted over time. A significance threshold is added to the curve, corresponding to a significance level of 0.05.

Principal Component Analysis

This last method consists of carrying out a covariance Principal Component Analysis (PCA) where subjects' exposures to a stimulus are the observations, and percentage changes of pupil diameter over significant times are the variables (see Schlens, 2005, for a brief introduction). In order to determine the number of components to be retained to obtain a sufficiently accurate summary of the information in the initial data, the elbow criterion is used. The elbow criterion is based on the observation of an eigenvalue plot observation of a sharp decrease of the function's slope. Factor loadings of the retained components are then plotted. Like Kuchinke et al. (2007), only factor loadings with an absolute value greater than 0.4 will be considered for interpretation. The interpretation consists in identifying parameters that transcribe components (e.g., mean pupil diameter over time). The defined parameters are then calculated, and

correlations between components and parameters are observed to validate the interpretation. Finally, a two-way ANOVA with stimulus and subject as factors on the coordinates of each component is computed.

The curve, peak dilation, comparison over time, and PCA methods can be undertaken using MATLAB routines that are also available on the journal's web site (DataProcess.m, Results_Curves.m, Results_PeakDilation, Results_TimesComparison and Results_PCA) (for more details, see the document referred to as "#Readme", attached to the routine).

Example of Application

Material and Method

Data acquisition, data pre-processing and data processing were realized by following the guidelines previously enunciated.

Data collected from twenty-two participants were used for analysis: 15 men and seven women, with a mean age of 45 years ($SD = 2.9$). They were financially compensated for their participation. All of them had a normal or corrected-to-normal vision and were at least occasional consumers of the product tested.

The product tested was a chocolate spread.

Results

Curves. The average baseline-corrected pupil diameter and percentage change of pupil diameter evolutions over time for the chocolate spread and the control situation (clean palette) are represented on Figure 2



with confidence intervals of 90%. The curves of the evolution of the pupil showed pupil dilation for the chocolate spread with a larger pupil diameter than during the natural variations of the pupil diameter from 300 ms to 1600 ms. The pupil dilation for the chocolate spread was approximately 0.12 mm, corresponding to a variation of 3% of the pupil diameter at rest.

Comparison over time. We compared moving averages (200 ms) between the spread and the control by performing a two-way ANOVA with stimuli and subjects as factors. The F statistic of the stimulus factor is plotted over time on Figure 3. The product signal was significantly different from the natural variations of pupil diameter, ranging from 280 ms to 1600 ms.

PCA. Computing a covariance PCA where subject \times condition (chocolate spread or clean palette) are the observations and where the pupil diameter for the significant times (280 ms-1600 ms) are the variables, we identified one principal component (PC) to retain according to the elbow criterion. This PC accounted for 91.33% of the overall variance. A plot of the factor loadings is illustrated in Figure 4. The retained component represents the average signal. We chose the parameter of the average over time to transcribe this component. The calculation of correlations between PC and the average pupil diameter over time showed significant correlation, $R = 0.999$ ($p < 0.001$), confirming our interpretation. Finally, we computed a two-way ANOVA of this component with condition and subject as factors. The ANOVA showed a significant main effect of condition ($p < 0.01$). In contrast, the component was not affected by the subject variable ($p = 0.53$). This result means that the clean palette and chocolate spread do not lead to identical mean pupil diameters.

Conclusion of the test

The results showed significant pupil dilation for the chocolate spread compared to the natural variations of pupil diameter with the clean palette. The pupil dilation with the chocolate spread was approximately 0.12 mm, corresponding to a variation of 3% of the pupil diameter at rest. This result was further supported by means of a principal component analysis. This suggests that the chocolate spread provoked emotions for the subjects and that the pupils reflected these emotions. However, the measurement of emotions caused by a food product on the basis of pupil diameter has not been studied in great detail as of this time. Applications on others food products are necessary to ensure that it

is a measure of emotions and not just of arousal.

Conclusions

The methodology guide presented in this paper was developed with the aim of helping anyone interested in conducting a pupillometry test in a tasting situation. The method described here covers data acquisition to data processing. It is obviously not the only way to conduct a pupillometry test and can be improved or adapted.

Pupillometry tests in tasting situations allow researchers to measure pupil response to products, but within certain limits. First, the tasting conditions presented are not natural. Tasting is done in a test room, and the subject must concentrate on a screen while limiting his or her movements. To make the conditions more natural, a head-mounted or other type of wearable eye tracker could be used. The subject would be freer to move. However, this would make it necessary to deal with light variations and to constantly make measurements with a light meter to eliminate pupil variations due to the light (pupil light reflex) (Watson & Yellott, 2012). Another limit is that emotions cannot be qualified with pupillometry alone. To qualify these emotions, a questionnaire could be administered in which the subject could rate certain emotions. For example, an existing emotions questionnaire could be used, but it would have to be short and simple since it would have to be repeated for each test. The only thing that we can be sure of in pupil response is that we measure arousal (Partala et al., 2003; Bradley, 2008). Also, to have more consistent results, the measurement of pupil size could be coupled with another physiological measure (such as electrodermal activity or heart rate). To correlate other quantitative data with pupil data, the coordinates of the PCA components, which reflect pupil response, could be used.

In terms of material, to limit the subject's movement, the researcher could consider using a chin rest or a straw/flexible tube. However, a chin rest is not suitable for tasting, especially for liquid products, and a straw is not adaptable to all food products, for example, solid foods or liquid products like whisky. The objective of the methodology is to be able to adapt it to all food products. Specific solutions cannot be proposed, but the experimenter is free to adapt the procedure to his/her products to facilitate consumption without excessive head movement.

The MATLAB routines available on the journal's web



site could be improved. For example, the development of an interface could be considered, but this requires time and, often, a change in the software version or operating system could make the interface unusable.

Finally, to take this analysis a step further, other multivariate analyses could be tested, including Independent Component Analysis, as suggested by Jainta & Baccino (2010, see Langlois, Chartier, and Gosselin, 2010, for an introduction), or Discriminant Analysis, and more precisely, Partial Least Squares-Discriminant Analysis (PLS-DA; Barker & Rayens, 2003).

In conclusion, in this paper, we aimed to demonstrate that pupil dilation that could transcribe emotions can be assessed during a tasting situation, but within certain limits. Among those limits are the lack of terms to interpret the measured emotions that require coupling pupil data with a qualitative questionnaire, the non-natural conditions of tasting, and, finally, the difficulty of controlling the other sources of variations in pupil diameter (stress, fatigue, lighting, etc.). Ultimately, concerning the assessment of emotions during a tasting situation, it would be interesting to apply this method to several other studies with different types of food stimuli. Moreover, it is important to observe that recent results suggest that the pupil size is related to arousal measures (Partala, 2033; Bradley, 2008). Therefore, an examination of this measurement cannot be used to draw definitive conclusions regarding differences in valence judgments.

Authors' notes and acknowledgments

The authors wish to thank Sylvain Sirois and Iain Jackson for making their MATLAB routines available to us, Sylvain Sirois for his precious help in proof-reading of this paper and Gail Wagman for her precious help in revising the English.

References

- Barker, M., & Rayens, W. (2003). Partial least squares for discrimination. *Journal of Chemometrics*, 17(3), 166–173. doi:10.1002/cem.785
- Barlow, J. D. (1969). Pupillary size as an index of preference in political candidates. *Perceptual and Motor Skills*, 28, 587–590.
- Bayer, M., Sommer, W., & Schacht, A. (2011). Emotional words impact the mind but not the body: Evidence from pupillary responses. *Psychophysiology*, 48(11), 1553–61. doi:10.1111/j.1469-8986.2011.01219.x
- Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The Pupillary System. In: J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. G. Berntson (Eds.). *Handbook of Psychophysiology* (2nd ed.) (pp. 142–162). New York: Cambridge University Press.
- Bernhardt, P. C., Dabbs, J. M., & Riad, J. K. (1996). Pupillometry system for use in social psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 28(1), 61–66. doi:10.3758/BF03203637
- Bernick, N., Kling, A., & Borowitz, G. (1971). Physiologic Differentiation of Sexual Arousal and Anxiety. *Psychosomatic medicine*, 33(4), 341–52.
- Bitsios, P., Szabadi, E., & Bradshaw, C. (2004). The fear-inhibited light reflex: Importance of the anticipation of an aversive event. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 52(1), 87–95. doi:10.1016/j.ijpsycho.2003.12.006
- Bornemann, B., Foth, M., Horn, J., Ries, J., Warmuth, E., Wartenburger, I., & Meer, E. (2010). Mathematical cognition: Individual differences in resource allocation. *Zdm Mathematics Education*, 42(6), 555–567. doi:10.1007/s11858-010-0253-x
- Bradley, M., Miccoli, L., Escrig, M., & Lang, P. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4), 602–607. doi:10.1111/j.1469-8986.2008.00654.x
- Bradshaw, J. L. (1968). Pupil size and problem solving. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20(2), 116–122.
- Causse, M., Sénard, J.M., Démonet, J. F., & Pastor, J. (2010). Monitoring cognitive and emotional processes through pupil and cardiac response during dynamic versus logical task. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 35(2), 115–123. doi:10.1007/s10484-009-9115-0
- Chrea, C., Grandjean, D., Delplanque, S., Cayeux, I., Le Calvé, B., Aymard, L., . . . Scherer, K. R. (2009). Mapping the semantic space for the subjective experience of emotional responses to odors. *Chemical Senses*, 34, 49–62. doi:10.1093/chemse/bjn052
- Conway, C. A., Jones, B. C., DeBruine, L. M., Little, A. C., & Sahraie, A. (2008). Transient pupil constrictions to faces are sensitive to orientation and species. *Journal of Vision*, 8, 1–11. doi:10.1167/8.3.17
- Coquin, J., Tafer, N., Mazerolles, M., Pouquet, O., Pfeiff, R., Richebé, P., & Janvier, G. (2009). Monitoring de la dilatation pupillaire dans l'évaluation d'une tolérance aiguë au rémifentanyl en chirurgie



- cardiaque. *Annales françaises d'anesthésie et de réanimation*, 28(11), 930-935. doi:10.1016/j.annfar.2009.07.073
- Dietz, J., Bradley, M. M., Okun, M. S., & Bowers, D. (2011). Emotion and ocular responses in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 49, 3247-53. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.07.029
- Dufresne, A., Prom Tep, S., Senechal, S., & Courtemanche, F. (2010). Physiological Measures, Eye Tracking and Task Analysis to Track User Reactions in User Generated Content. *Proceedings of Measuring Behavior*, (August 24-27), 218-22.
- Einhäuser, W., Stout, J., Koch, C., & Carter, O. (2008). Pupil dilation reflects perceptual selection and predicts subsequent stability in perceptual rivalry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(5), 1704-9. doi:10.1073/pnas.0707727105
- Espeseth, T., van de Pavert, S. H. P., Jynge, S., Sneve, M. H., & Laeng, B. (2010). The pupil dilates as a function of attentional effort in multiple object tracking. In *EyeTrackConf* Uppsala.
- Gabay, S., Pertzov, Y., & Henik, A. (2011). Orienting of attention, pupil size, and the norepinephrine system. *Attention, Perception & Psychophysics*, 73(1), 123-129. doi:10.3758/s13414-010-0015-4
- Gagl, B., Hawelka, S., & Hutzler, F. (2011). Systematic influence of gaze position on pupil size measurement: Analysis and correction. *Behavior Research Methods*, 43(4), 1171-81. doi:10.3758/s13428-011-0109-5
- Geangu, E., Hauf, P., Bhardwaj, R., & Bentz, W. (2011). Infant pupil diameter changes in response to others' positive and negative emotions. *PloS One*, 6(11), 1-10. doi:10.1371/journal.pone.0027132
- Goldinger, S. D., & Papesch, M. H. (2012). Pupil Dilation Reflects the Creation and Retrieval of Memories. *Current Directions in Psychological Science*, 21, 90-5. doi:10.1177/0963721412436811
- Granholm, E., & Steinhauer, S. R. (2004). Pupillometric measures of cognitive and emotional processes. *International Journal of Psychophysiology*, 52, 1-6. doi:10.1016/j.ijpsycho.2003.12.001
- Gredebäck, G. (2010). Pupil dilation and social cognition in infancy. In *EyeTrackConf* Uppsala.
- Heitz, R. P., Schrock, J. C., Payne, T. W., & Engle, R. W. (2008). Effects of incentive on working memory capacity: behavioral and pupillometric data. *Psychophysiology*, 45, 119-29. doi:10.1111/j.1469-8986.2007.00605.x
- Hepach, R., & Westermann, G. (2010). Deriving meaning from infants' pupillary responses to emotional stimuli. In *EyeTrackConf* Uppsala.
- Hess, E. H. (1960). Pupil size as related to interest value of visual stimuli. *Science*, 132, 349-50.
- Hess, E. H. (1975). The role of pupil size in communication. *Scientific American*, 233(5), 116-9.
- Hess, E. H., & Polt, J. M. (1966). Changes in pupil size as a measure of taste difference. *Perceptual and Motor Skills*, 23, 451-455.
- Höfle, M., Kenntner-Mabiala, R., Pauli, P., & Alpers, G. (2008). You can see pain in the eye: Pupillometry as an index of pain intensity under different luminance conditions. *International journal of psychophysiology: Official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 70(3), 171-175. doi:10.1016/j.ijpsycho.2008.06.008
- Honma, M., Tanaka, Y., Osada, Y., & Kuriyama, K. (2012). Perceptual and not physical eye contact elicits pupillary dilation. *Biological Psychology*, 89, 112-6. doi:10.1016/j.biopsycho.2011.09.015
- Hyönä, J., Tömmola, J., & Alaja, A. M. (1995). Pupil dilation as a measure of processing load in simultaneous interpretation and other language tasks. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48A(3), 598-612.
- Iqbal, S. T., Zheng, X. S., & Bailey, B. P. (2004). Task-evoked pupillary response to mental workload in human-computer interaction. In *Conference on Human factors and computing systems - CHI*. Vienna, Austria: ACM Press. doi:10.1145/985921.986094
- Jackson, L., & Sirois, S. (2009). Infant cognition: Going full factorial with pupil dilation. *Developmental Science*, 12(4), 670-679. doi:10.1111/j.1467-7687.2008.00805.x
- Jainta, S., & Baccino, T. (2010). Analyzing the pupil response due to increased cognitive demand: An independent component analysis study. *International Journal of Psychophysiology*, 77(1), 1-7. doi:10.1016/j.ijpsycho.2010.03.008
- Johansson, R., Holmqvist, K., Mossberg, F., & Lindgren, M. (2011). Eye movements and reading comprehension while listening to preferred and non-preferred study music. *Psychology of Music*, 40(3), 339-56. doi:10.1177/0305735610387777
- King, S. C., Meiselman, H. L., & Carr, T. B. (2010). Measuring emotions associated with foods in consumer testing. *Food Quality and Preference*, 21, 1114-16. doi:10.1016/j.foodqual.2010.08.004



- Klingner, J., Kumar, R., & Hanrahan, P. (2008). Measuring the task-evoked pupillary response with a remote eye tracker. In *Eye Tracking Research & Applications - ETRA Savannah, Georgia*.
- Kuchinke, L., Võ, M. L.-H., Hofmann, M., & Jacobs, A. M. (2007). Pupillary responses during lexical decisions vary with word frequency but not emotional valence. *International Journal of Psychophysiology*, 65(2), 132–40. doi:10.1016/j.ijpsycho.2007.04.004
- Kuchinke, L., Schneider, D., Kotz, S. a., & Jacobs, A. M. (2011). Spontaneous but not explicit processing of positive sentences impaired in Asperger's syndrome: pupillometric evidence. *Neuropsychologia*, 49(3), 331–8. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.026
- Kuchinsky, S. E., Dubno, J. R., Humes, L. E., Ahlstrom, J. B., Cute, S. L., & Eckert, M. A. (2011). Evaluation of pupil size as an indicator of listening effort. Talk presented at the MUSC Hearing Science Interest Group Meeting.
- Kuchinsky, S. E., Ahlstrom, J. B., Vaden, K. I., Cute, S. L., Humes, L. E., Dubno, J. R., & Eckert, M. a. (2013). Pupil size varies with word listening and response selection difficulty in older adults with hearing loss. *Psychophysiology*, 50(1), 23–34. doi:10.1111/j.1469-8986.2012.01477.x
- Laeng, B., & Falkenberg, L. (2007). Women's pupillary responses to sexually significant others during the hormonal cycle. *Hormones and Behavior*, 52(4), 520–530. doi:10.1016/j.yhbeh.2007.07.013
- Laeng, B. (2010). Eyes Wide Open - The Pupillometry of Desire. *EyeTrackConf.Uppsala*.
- Larmande, P. & Larmande, A. (1989). *Neuro-ophthalmologie*. Paris: Masson.
- Langlois, D., Chartier, S., & Gosselin, D. (2010) An Introduction to Independent Component Analysis: InfoMax and FastICA algorithms , *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 6, 31-38.
- Loewenfeld, I. E., & Rosskoth, H. D. (1974). Infrared pupil camera: A new method for mass screening and clinical use. *Am J Ophthalmol*, 78, 304.
- Loewenfeld, I. E. (1993). The Pupil: Anatomy, Physiology, and Clinical Applications. Ames: Iowa State University Press. *Chapter 13* (pp. 648–78).
- Lowenstein O, Loewenfeld I.E. (1958). Electronic pupillography: A new instrument and some clinical applications. *Arch Ophthalmol*, 59:352, 63.
- Ng, M., Chaya, C., & Hort, J. (2013). Beyond liking: Comparing the measurement of emotional response using EsSense Profile and consumer defined check-all-that-apply methodologies. *Food Quality and Preference*, 28, 193–205. doi:10.1016/j.foodqual.2012.08.012
- Otero, S. C., Weekes, B. S., & Hutton, S. B. (2011). Pupil size changes during recognition memory. *Psychophysiology*, 48, 1346–53. doi:10.1111/j.1469-8986.2011.01217.x
- Palinko, O., Kun, A. L., Shyrov, A., & Heeman, P. (2010). Estimating cognitive load using remote eye tracking in a driving simulator. *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications - ETRA '10*, 141–144. doi:10.1145/1743666.1743701
- Partala, T., & Surakka, V. (2003). Pupil size variation as an indication of affective processing. *International Journal of Human-Computer Studies*, 59(1-2), 185–198. doi:10.1016/S1071-5819(03)00017-X
- Piquado, T., Isaacowitz, D., & Wingfield, A. (2010). Pupillometry as a measure of cognitive effort in younger and older adults. *Psychophysiology*, 47(3), 560–69. doi:10.1111/j.1469-8986.2009.00947.x
- Pupillometry
- Porcherot, C., Delplanque, S., Planchais, A., Gaudreau, N., Accolla, R., & Cayeux, I. (2012). Influence of food odorant names on the verbal measurement of emotions. *Food Quality and Preference*, 23, 125–133. doi:10.1016/j.foodqual.2011.07.006
- Porcherot, C., Delplanque, S., Raviot-Derrien, S., Le Calvé, B., Chrea, C., Gaudreau, N., & Cayeux, I. (2010). How do you feel when you smell this? Optimization of a verbal measurement of odor-elicited emotions. *Food Quality and Preference*, 21(8), 938–947. doi:10.1016/j.foodqual.2010.03.012
- Prenn, K., Heekeren, H. R., & van der Meer, E. (2011). Influence of affective significance on different levels of processing using pupil dilation in an analogical reasoning task. *International Journal of Psychophysiology*, 79, 236–43. doi:10.1016/j.ijpsycho.2010.10.014
- Raisig, S., Welke, T., Hagendorf, H., & van der Meer, E. (2007). Investigating dimensional organization in scripts using the pupillary response. *Psychophysiology*, 44(6), 864–73. doi:10.1111/j.1469-8986.2007.00592.x
- Raisig, S., Welke, T., Hagendorf, H., & van der Meer, E. (2010). I spy with my little eye: detection of temporal violations in event sequences and the pupillary response. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*,



- 76(1), 1–8. doi:10.1016/j.jpsycho.2010.01.006
- Rieger, G., & Savin-Williams, R. C. (2012). The eyes have it: Sex and sexual orientation differences in pupil dilation patterns. *PloS One*, 7(8), 1–10. doi:10.1371/journal.pone.0040256
- Rougier, M., & Riss, I. (2000). Motricité pupillaire. *Encyclopédie Médico-chirurgicale, Neurologie*.
- Rouvière, H., & Delmas A. (1981). Anatomie humaine descriptive, topographique et fonctionnelle. 11ème éd. Tome 1. Tête et cou. Paris: Masson.
- Schneider, C., Ziemssen, T., Schuster, B., Seo, H., Haehner, A., & Hummel, T. (2009). Pupillary responses to intranasal trigeminal and olfactory stimulation. *Journal of Neural Transmission*, 116(7), 885–889. doi:10.1007/s00702-009-0244-7
- Siegle, G. J., Granholm, E., Ingram, R. E., & Matt, G. E. (2001). Pupillary and reaction time measures of sustained processing of negative information in depression. *Biological Psychiatry*, 49, 624–36. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11297720>
- Siegle, G. J., Steinhauer, S. R., Carter, C. S., Ramel, W., & Thase, M. E. (2003). Do the seconds turn into hours? relationships between sustained pupil dilation in response to emotional information and self-reported rumination. *Cognitive Therapy and Research*, 27(3), 365–382.
- Sirois, S., & Jackson, I. (2010). Pupil dilation, goal attribution, and object identity in infants. *EyeTrackConf*. Uppsala.
- Shlens, J. (2005) A Tutorial on Principal Component Analysis. Retrieved from <http://www.brainmapping.org/NITP/PNA/Readings/pca.pdf>.
- Stone, B., Lee, M., Dennis, S., & Nettelbeck, T. (2003). Pupil Size and Mental Load. *1st Adelaide Mental Life Conference*, Adelaide, SA
- Tombs, S., & Silverman, I. (2004). Pupillometry: A sexual selection approach. *Evolution and Human Behavior*, 25, 221–228. doi:10.1016/j.evolhumbehav.2004.05.001
- Ullwer, D., Bornemann, B., Ries, J., Horn, J., Foth, M., Preusse, F., & van der Meer, E. (2009). Resource allocation and problem solving strategies during a geometric analogy task in individuals differing in fluid intelligence. *Paper for the 2nd Analogy Conference*, NBU Press: Sofia
- Ullwer, D., Ries, J., Foth, M., & van der Meer, E. (2010). Resource allocation and learning in individuals differing in cognitive abilities - insights from pupillometry and eye - movement analysis. In *EyeTrackConf*. Uppsala.
- Urry, H. L., van Reekum, C. M., Johnstone, T., & Davidson, R. J. (2009). Individual differences in some (but not all) medial prefrontal regions reflect cognitive demand while regulating unpleasant emotion. *NeuroImage*, 47(3), 852–63. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.05.069
- Verney, S. P., Granholm, E., & Dionisio, D. P. (2001). Pupillary responses and processing resources on the visual backward masking task. *Psychophysiology*, 38, 76–83. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11321622>
- Vö, M., Jacobs, A. M., Kuchinke, L., Hofmann, M., Conrad, M., Schacht, A., & Hutzler, F. (2008). The coupling of emotion and cognition in the eye: Introducing the pupil old/new effect. *Psychophysiology*, 45(1), 130–140. doi:10.1111/j.1469-8986.2007.00606.x
- Watson, A. B., & Yellott, J. I. (2012). A unified formula for light-adapted pupil size. *Journal of Vision*, 12(10), 1–16. doi:10.1167/12.10.12.
- Wierda, S. M., Rijn, H. Van, Taatgen, N. A., & Martens, S. (2012). Pupil dilation deconvolution reveals the dynamics of attention at high temporal resolution. doi:10.1073/pnas.1201858109/-/DCSupplemental. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1201858109
- Wilhelm, H., & Wilhelm, B. (2010). View onto alertness - objective assessment of central nervous activation level by pupillography.pdf. *EyeTrackConf*. Uppsala.
- Winter, D. A. (1990). Biomechanics and motor control of human movement. New York: Wiley-Interscience.
- Wu, E., Laeng, B., & Magnussen, S. (2010). Through the eyes of the own-race bias. *EyeTrackConf*. Uppsala.

Appendix: GUIDELINES FOR USING MATLAB ROUTINES

Three MATLAB routines (some of them adapted from programs and using a function written by Jackson & Sirois (2009)) are available on the journal's web site. They were written for the data files of the Tobii Studio. For other types of data files, they will probably need to be adapted. They were written with the objective of comparing a product and a control situation or products between themselves. They have to be adapted if there are factors other than subject and product. Nota bene: stimuli = conditions

Note to programmers: These programs can be improved, adapted and/or modified; feel free to rewrite them.

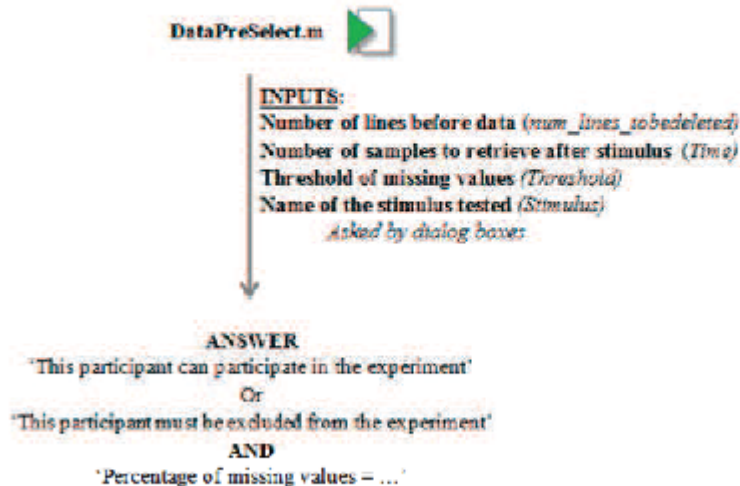


Figure A.1 ■ DataPreSelect steps

Prerequisite: Test Design

To be able to retrieve pupil response data specific to a stimulus, a file with a specific name must be added per stimulus as media in the Tobii test (see Tobii Studio Manual). We recommend calling it 'StimulationX' for each stimulation and adding it as an image in jpg format. In fact, the naming convention 'StimulationX.jpg' is the default value in our MATLAB routines (attention: it is the file that must be named 'StimulationX', not the media element). In that way, the variable 'StimuliName' in the raw data will provide information about the stimulation presented at each moment of the recording.

A model of a Tobii Studio project is attached to this paper (PupillometryTest_Example.nas).

MATLAB routine n°1: DataPreSelect.m

This program indicates the percentage of missing values for a chosen stimulus in order to help with the decision-making during the pre-selection of participants. It is linked to the function 'Data_export_quality'. It must be used for one participant at a time.

Some information must be specified.

Number of lines before data to be deleted: this number varies depending on the variables of the test. To discover it, a file must be opened to see how many lines there are before the first row of data

Number of samples to retrieve after stimulus: this corresponds to the number of samples for which the quality code will be retrieved. It depends on the time of the stimulus tested for the pre-selection. We recommend fixing the time of this stimulus at 2 s and retrieval at 1.5 s, with 90 samples if the sampling frequency is 60 Hz.

Threshold of missing values: this corresponds to the threshold fixed to decide if the recording is good or not. We recommend 18% (see 'Subject Pre-selection' in the paper).

Name of the stimulus tested: this corresponds to the name of the file used for the media of the stimulus tested, where the name is indicated as the variable 'StimuliName'.

The program then gives the percentage of missing values observed and the decision: 'This participant can participate in the experiment' or 'This participant must be excluded from the experiment'

A synthesis of the different steps is shown in Figure A.1.

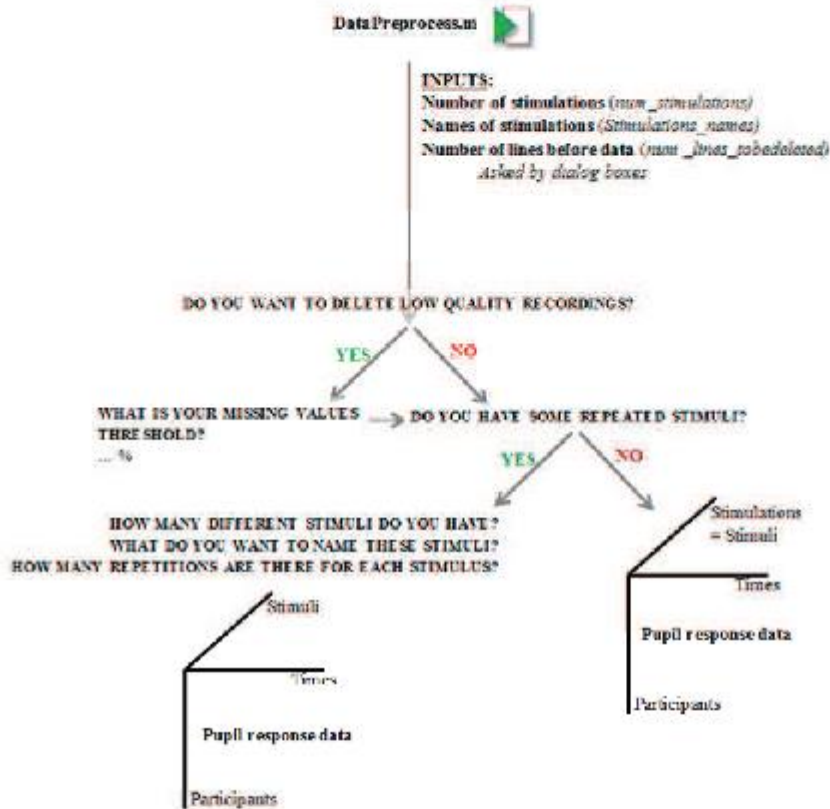


Figure A.2 ■ DataPreprocess steps

MATLAB routine n°2: DataPreProcess.m

This program allows the three steps of data pre-processing, extraction, cleaning and baseline correction to be undertaken. It is linked to the functions 'Data_export_data' and 'DataCleanLR' for cleaning. Any use of this last function must recognize and cite the source (Jackson & Sirois, 2009).

In chronological order, this program:

Selects data as of 1 s before each stimulus to 2.5 s after each stimulus (60 and 150 samples, respectively, with a sampling frequency of 60 Hertz; it will need to be adjusted for other sampling frequencies)

Cleans data

Corrects data

To execute the program, some information needs to be specified:

Number of stimulations: this corresponds to the number of stimulations in the study where the pupil response is in the raw data file, including repetitions (e.g., if three products are repeated twice each, and one control situation repeated twice, all of which are studied in the same session, '8' must be indicated).

Names of stimulations: this corresponds to the names of the stimulations presented during the measurement period,



2014 ■ vol. 10 ■ no. 2

including repetitions. The default values are 'StimulationX.jpg' in the MATLAB program. Attention: if a stimulus is repeated, all repetitions of this stimulus must be grouped or the program must be modified.

Number of lines before data: as for the MATLAB routine n°1, this corresponds to the number of lines to delete before the first data.

A synthesis of the different steps is shown in Figure A.2.

MATLAB routine n°3: DataProcess.m

This program allows pupil data processing on the basis of the four methods proposed in the paper:

- Curves
- Peak dilation
- Comparison over time
- PCA

For this, you have to specify what stimuli you want to compare and the rank of these stimuli in the data matrix. Also, some outputs of 'DataPreprocess.m' are necessary: baseline-corrected data and the percentage of change for each stimulation and averages over repetitions for each stimulus. You then have to specify if you want to compare only stimuli (without the control situation). In fact, the peak dilation is computed only when you compare two or more products but not product(s) and a control situation during which there is normally no peak dilation. In some cases, you have to specify yourself, the statistic F of your stimulus factor (you have to read it in Fisher table - In Workspace: numerator = ddf_1 and denominator = ddf_error). To finish, you have to make two decisions. The first one is to determine a significant period over which you want to compute PCA by indicating the beginning of the period and the end. You can do this using the plot of F (condition factor) over time. The second is the number of components to select by using the elbow criterion while observing the eigenvalue plot. This program does not display the results. To do this, the following programs must be used:

Results_Curves / Results_PeakDilation / Results_TimesComparison / Results_PCA

The different steps can be found in Figure A.3.

Note: This program uses the Fisher table. This matrix has to be added to the current folder

MATLAB routines n°4-5-6-7: Results_METHOD.m

These four programs allow you to display the results.

Results_Curves

This makes it possible to trace the curves of the baseline-corrected pupil diameter and/or the percentage of change of pupil diameter over time. Four questions must be answered:

'Do you want to trace the percentage of change in pupil diameter over time?' (YES or NO)

'Do you want to add confidence intervals?' (YES or NO)

'Do you want to trace the baseline-corrected pupil diameter evolution?' (YES or NO)

'Do you want to add confidence intervals?' (YES or NO)

Results_PeakDilation

This program indicates if there is a significant condition effect on peak dilations and displays the table of ANOVA results.

Results_TimesComparison

This program indicates if there is a significant condition effect on the percentage of variation at least once. It also allows you to trace the p-value and/or the statistic F of the condition effect over time. To do this, you need to answer the following questions:

'Do you want to trace the condition factor p-value over time?' (YES or NO)

'Do you want to trace F of the condition factor over time?' (YES or NO)

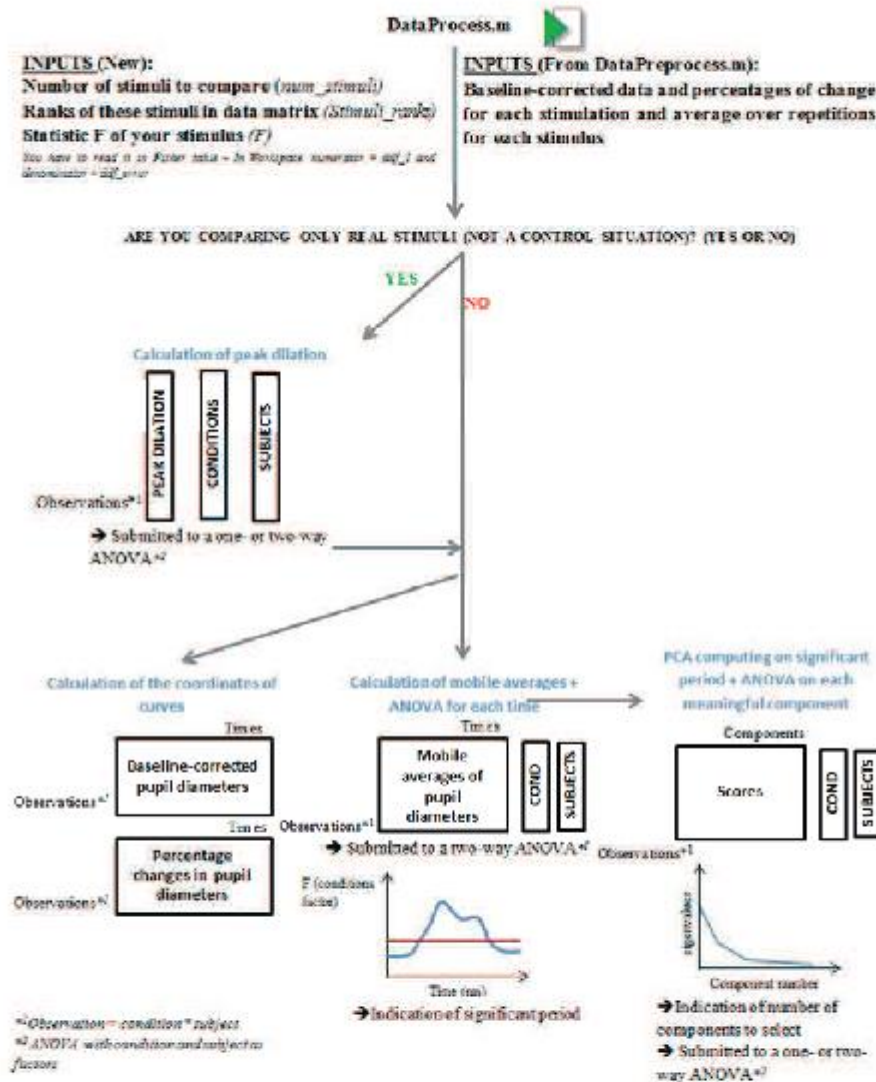


Figure A.3 ■ DataProcess steps

Results_PCA

This last program indicates if there is a meaningful component(s) that discriminate(s) against the conditions and that traces the factor loadings over time to allow the interpretation of the components.



Citation

Lemercier, A., Guillot, G., Courcoux, P., Garrel, C., Baccino, P., & Schlich, P. (2014). Pupillometry of taste: Methodological guide – from acquisition to data processing - and toolbox for MATLAB. *The Quantitative Methods for Psychology*, 10 (2), 179-195.

Copyright © 2014 Lemercier, Guillot, Courcoux, Garrel, Baccino, Schlich. This is an open-access article distributed under the terms of the *Creative Commons Attribution License (CC BY)*. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Received: 15/05/14 ~ Accepted: 16/06/14

Table 1 follows...

Table 1 ■ Review of number of participants (n), data pre-processing and processing within the context of pupillometry studies

Data pre-processing			Data processing			
Smoothing	Blink replacement	Baseline	Time Window (s)	Dependent variable	Statistical tests	Graphical representation
<i>Borneman et al., 2011, Experiment 1 (n = 34)</i>						
None	excessive blinking: trial removed, small blinks: linear interpolation	200 ms	1000 ms	Peak dilation (max 0 - 1000 ms)	Pearson correlation ANOVA	Curves
<i>Bradley et al., 2008, Experiment 1 (n = 27)</i>						
None	linear interpolation	1 s	2 s 6 s (because of initial light reflex due to picture)	Mean pupil change (from baseline)	Multivariate statistics	Curves, graph (mean change per condition)
<i>Conway et al., 2008, Experiment 1 (n = 12), Experiment 2 (n = 10), and Experiment 3 (n = 20)</i>						
None	Removal when containing artefacts	None	4000 ms	Pupil changes (100 ms at the onset - 100 ms at the offset), Latency	ANOVA, t-tests	Curves, Bar graph (av- erage pupil constriction per condition)
<i>Dietz et al., 2011, Experiment 1 (n = 15) and Experiment 2 (n = 15)</i>						
None	Interpolation	1 s	6000 ms	Pupil changes (2.5 s - 6 s) from light reflex (max constriction 0 - 2 s) (mm) correlations	t-tests, MANOVA, Spearman rank correlations	Curves
<i>Geangu et al., 2011, Experiment 1 (n = 15)</i>						
Cut frequency ratio: 12.5 (250 ms)	One eye: other eye used for interpolation Two eyes : linear interpolation	1 s	25 s	Mean pupil changes after the light reflex (2-25 s)	ANOVA spline functions t-test	Curves
<i>Höfle et al., 2008, Experiment 1 (n = 20)</i>						
None	Blinks removed *	1 s	20 s	Peak dilation (mean of second epoch (epoch = 1 s))	ANOVA Correlation	Curves (a mean by 1 s- epoch)

Data pre-processing			Data processing		
Smoothing	Blink replacement	Baseline	Time Window (s)	Dependent variable	Statistical tests
<i>Honma et al., 2012, Experiment 1 (n = 42)</i>					
None	None	2 s	1000 ms before - 1000 ms after	Pupil changes	Many types **
<i>Jackson & Sirois, 2009, Experiment 1 (n = 24)</i>					
Out frequency ratio: 12.5 (250 ms)	One eye: other eye used for interpolation Two eyes : linear interpolation	None	24 s	Mean pupil diameters over time Peak dilation	Functional data analysis B-spline ANOVA, t-tests, Correlation
<i>Jointa & Baccino, 2010, Experiment 1 (n = 10)</i>					
None	Trial excluded if excessive blinks* (≥ 3) or linear interpolation	Average of trial	5000 ms	Average pupil size Mean pupil diameter over time	ANOVA, t-tests, PCA, ICA
<i>Kuchinke et al., 2007, Experiment 1 (n = 26)</i>					
7-points (116.67 ms)	Major blinks: trials discarded Smaller artifacts: linear interpolation	200 ms	1500 ms	Peak dilation (max of trial)	rmANOVA PCA → rmANOVA
<i>Kuchinke et al., 2011, Experiment 1 (n = 19) and Experiment 2 (n = 21)</i>					
7-points (116.67 ms)	Interpolation (when possible)	200 ms	3500 ms	Mean pupil diameter, Area under the curve	ANOVA, t-tests Consecutive ANOVAs for each 50 ms time
<i>Kuchinsky et al., 2013 (n = 19)</i>					
5-points (83.35 ms)	Interpolation or Exclusion ^b	1000 ms	1883.71 ms 1500 ms	Mean pupil diameter, Amplitudes, Latencies	Growth curve analysis (GCA), ANOVA, Correlation
<i>Laeng & Falkenberg, 2007, Experiment 1 (n = 14)</i>					
None	None	None	10 s	Mean pupillary change ^c	ANOVA
					Graph (mean pupillary change per condition)

Data pre-processing			Data processing			
Smoothing	Blink replacement	Baseline	Time Window (s)	Dependent variable	Statistical tests	Graphical representation
<i>Otero et al., 2011, Experiment 1 (n = 45)</i>						
None	No trials were lost ^d	None	2000 ms	Mean pupil dilation ratio ^e	t-test	Bar graph, (average pupil dilation ratio per condition)
<i>Otero et al., 2011, Experiment 2 (n = 44)</i>						
None	None	250 ms (max)	4000 ms	Pupil dilation ratio ^a	ANOVA t-tests	Bar graph, (average pupil dilation ratio per condition)
<i>Otero et al., 2011, Experiment 3 (n = 37)</i>						
None	None	None	2000 ms	Mean pupil dilation ratio ^e	ANOVA t-tests	Bar graph (average pupil dilation ratio per condition)
<i>Partala & Surakka, 2003, Experiment 1 (n = 31)</i>						
None	Visual: Blink replaced by the last valid value; Statistical : blinks and artifacts ^e removed	1 s	2000 ms or 6000 ms	Mean (6 s or 2 s)	ANOVA t-tests	Curves; Bar graph (mean pupil diameter change per condition)
<i>Prehn et al., 2011, Experiment 1 (n = 30)</i>						
7-points (140 ms)	Excessive blinking or eye-movements: removed; Very small blinks: linear interpolation	200 ms	3500 ms	Peak dilation (max 0.5 - 3.5 s) Latency	ANOVA t-tests	Curves, Bar graph (peak dilation per condition)
<i>Raisig et al., 2007 (n = 27)</i>						
±5-points (200 ms)	Interpolation (when possible)	150 ms	5000 ms	Peak Dilation (Max 0 - 5 s); Pupil changes (mm)	PCA + varimax rotation	Curves

Data pre-processing			Data processing			
Smoothing	Blink replacement	Baseline	Time Window (s)	Dependent variable	Statistical tests	Graphical representation
<i>Raigis et al., 2010 (n = 30)</i>						
± 5 -points (200 ms)	Interpolation (when possible)	200 ms	Curves: -1 s 6.5 s; Stat. tests : 3.2 s 4.8 s	Pupil changes (mm)	ANOVA t-tests	Curves
<i>Ullmer et al., 2009, Experiment 1 (n = 37)</i>						
None	None	1 s	variable (until response)	Mean Pupillary dilation	ANOVA	Bar graph (pupillary dilation per condition)
<i>Vö et al., 2008, Experiment 1 (n = 19)</i>						
None	Large changes in pupillary responses: trials excluded	200 ms	1800 ms	Peak dilation (max 0 - 1800 ms)	ANOVA	Curves
<i>Wierda et al., 2012, Experiment 1 (n = 20)</i>						
None	Segments containing eye blinks: trials excluded	200 ms	4300 ms	Attentional pulses	Deconvolution	Curves, Deconvoluted attentional pulses

Notes:

The average number of participants is 24, the median is 21 (minimum is 10 and maximum is 45).

The average smoothing time is 169.59 ms (based only on references using baseline).

*: Pupil values larger or smaller than $M \pm 3SD$ are considered artifacts.

**: ANOVA, ANCOVA, Multiple comparisons, Welch's t-test, Linear and logarithmic regression analyses, Pearson's correlation.

a: When pupil signal is below 60% of the median size for at least 50 ms.

b: If more than 50% of the data required interpolation.

c: Mean pupillary value for each condition divided by each participant's overall mean pupil size.

d: Thanks to averages across 50 trials.

e: The ratio is based on the maximum pupil size from last 1750 ms divided by the maximum pupil size from first 250 ms.

f: The ratio is based on the maximum pupil size from last 3500 ms divided by the maximum pupil size from first 250 ms.

g: Brief increases or decreases of at least 0.375 mm within a 20 ms window.

RÉSUMÉ

Les perceptions sensorielles et hédoniques résultent de processus complexes d'intégration, qui ne sont pas seulement rationnels, mais aussi fondés sur des sentiments, des émotions et des souvenirs. Afin d'appréhender au mieux le comportement du consommateur, il est devenu indispensable de mesurer les émotions afin de comprendre leur rôle fondamental dans la prise de décision. En science du consommateur, les émotions sont principalement mesurées par questionnaire. Malheureusement, cette mesure reste subjective et limitée car les sujets ont du mal à exprimer précisément leurs émotions par des mots. L'objectif de cette thèse était de contribuer à la compréhension de l'influence des émotions sur les perceptions hédoniques en développant un outil de mesure objectif fondé sur la pupillométrie. Ce travail de thèse a permis le développement d'une méthodologie adaptée à la situation de dégustation. Il a également permis de mettre en évidence que toute stimulation gustative même dépourvue d'émotion entraînait une dilatation pupillaire, mettant l'accent sur l'intérêt de comparer des stimuli similaires ou d'avoir une situation contrôle. Ensuite, différentes expérimentations ont permis de montrer que les différents éléments du contexte alimentaire avaient des pouvoirs émotionnels différents. Notamment les odeurs comme celles de boissons alcoolisées sont de fort vecteurs émotionnels tout comme les stimuli auditifs lorsqu'ils affectent directement le sujet. Enfin, la mesure en parallèle de l'appréciation hédonique nous a permis de montrer que la préférence n'est pas l'unique déterminant des émotions et de confirmer que les émotions peuvent impacter l'appréciation hédonique.

Mots clés : émotions, pupillométrie, appréciation hédonique, stimuli gustatifs, stimuli auditifs, stimuli olfactifs, boissons alcoolisées

ABSTRACT

Sensory and hedonic perceptions are the result of complex integration processes that are not only rational but that are also based on sentiments, emotions and memories. In order to better understand consumer behavior, it has become essential to measure emotions in order to understand their fundamental role in decision-making. In the field of consumer science, emotions are generally measured using questionnaires. Unfortunately, this measurement remains subjective and limited because it is difficult for subjects to precisely express their emotions through words. The aim of this thesis was to contribute to the understanding of the influence of emotions on hedonic perceptions by developing an objective measurement tool based on pupillometry. This PhD research made it possible to develop a methodology adapted to tasting situations and to show that all gustative stimulation, even that lacking emotion, leads to pupillary dilation, emphasizing the interest in comparing similar stimuli or having a control situation. Finally, different experiments revealed that the different elements within the food context had different emotional powers. In particular, smells, like those of alcoholic beverages, are strong emotional vectors, just like auditory stimuli when they directly affect the subject. Finally, by measuring the hedonic assessment at the same time, we were able to show that preference is not just determined by emotions and to confirm that emotions can have an impact on the hedonic assessment.

Keywords: emotions, pupillometry, hedonic assessment, gustative stimuli, auditory stimuli, olfactory stimuli, alcoholic beverages